



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PERANCANGAN KONTROLER PID DENGAN MENGGUNAKAN  
TEKNIK MRAC UNTUK MENGATUR LEVEL PADA *QUADRUPLE*  
TANK**

Muhammad Baihaqi  
NRP 2213100186

Dosen Pembimbing  
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.  
Prof.Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**FINAL PROJECT - TE 141599**

**PID CONTROLLER DESIGN USING MRAC TECHNIQUE FOR  
CONTROLLING QUADRUPLE TANK LEVEL**

Muhammad Baihaqi  
NRP 2213100186

Advisor  
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.  
Prof. Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Perancangan Kontroler PID dengan Menggunakan Teknik MRAC untuk Mengatur Level Pada *Quadruple Tank*”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2016

**Muhammad Baihaqi**  
NRP 2213100186



**PERANCANGAN KOTROLER PID DENGAN  
MENGUNAKAN TEKNIK MRAC UNTUK  
MENGATUR LEVEL PADA *QUADRUPLE TANK***

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing 1**

**Dosen Pembimbing 2**

**Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.**

**NIP. 1957 04 24 1985 02 1 001**

**Prof.Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D**

**NIP. 1953 07 19 1978 03 1 001**





# PERANCANGAN KOTROLER PID DENGAN MENGUNAKAN TEKNIK MRAC UNTUK MENGATUR LEVEL PADA QUADRUPLE TANK

Nama : Muhammad Baihaqi  
Pembimbing I : Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.  
Pembimbing II : Prof.Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D

## ABSTRAK

Pada penelitian ini proses di quadruple tank dipelajari dan selanjutnya didesain suatu kontroler adaptif yang dapat mengatur ketinggian air pada tangki 1 dan tangki 2 dalam kondisi tidak nominal. Quadruple tank merupakan sistem nonlinier. Bagian nonlinear nya terletak pada hubungan antara variabel debit cairan yang keluar dari tangki 3 dan ketinggian cairan pada tangki 3, juga debit cairan yang keluar dari tangki 4 dengan dan ketinggian cairan pada tangki 4. Selanjutnya dilakukan linearisasi dan penghilangan interaksi silang pada model dengan kondisi awal nol menggunakan *decoupler*. Tangki 3 dan tangki 4 pada *quadruple tank* tidak memiliki sensor ketinggian, sedangkan air yang keluar dari bagian bawah tangki 3 ke tangki 1 dan cairan yang keluar dari bagian bawah tangki 4 ke tangki 2. Tangki 1 dan tangki 2 akan diatur ketinggiannya, maka perlu dirancang observer yang dapat mengestimasi nilai ketinggian cairan di tangki 3 dan tangki 4. Kontroler MRAC PID digunakan untuk mempertahankan respon *plant* saat diberikan beban. Perubahan fasa dan ukuran lubang buang tangki 1 dan 2 menjadi beban yang diberikan. Sinyal uji masukan yang digunakan berupa sinyal *unit step* dan sinyal naik. MRAC PID terbukti mampu menjaga level lebih baik dari *decoupler* saat pembebanan dengan perbedaan RMSE 11% saat masukan *unit step*. Didapatkan RMSE dari pengujian dengan sinyal *unit step* sebesar 0,1cm untuk berbeban perubahan fasa dan 0,18cm untuk berbeban perubahan lubang buang. Pengujian *tracking level* naik dilakukan dan menghasilkan RMSE 0,12cm untuk berbeban perubahan fasa dan 0,27cm untuk berbeban perubahan lubang buang.

**Kata Kunci :** *Quadruple Tank Plant*, pengaturan proses, *decoupler*, MRAC.

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

# ***PID CONTROLLER DESIGN USING MRAC TECHNIQUE FOR CONTROLLING QUADRUPLE TANK LEVEL***

*Name* : Muhammad Baihaqi  
*1<sup>st</sup> Advisor* : Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.  
*2<sup>st</sup> Advisor* : Prof.Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D

## **ABSTRACT**

*In this study the quadruple tank process was studied and an adaptive controller that can adjust the water level in tank 1 and tank 2 in non-nominal condition successfully designed. Quadruple tank is a nonlinear system. The nonlinear part lies in the relationship between the liquid discharge variables coming out of the tank 3 and the liquid level in the tank 3, as well as the discharge of the liquid coming out of the tank 4 with and the fluid level in the tank 4. Linearization and cross-interaction disappearance on the model with zero initial conditions using decoupler. Tank 3 and tank 4 on the quadruple tank do not have a height sensor, while the water coming out from the bottom of the tank 3 to the tank 1 and the liquid coming out from the bottom of the tank 4 to the tank 2. The water level in tank 1 and tank 2 will be regulated, it is necessary to designed observers which can estimate fluid level values in tanks and tank 4. MRAC PID controllers are used to maintain the response of the plant when load is applied. The phase changing and size of the tank 1 and 2 exhaust holes become the given load. The input test signal used are a unit step signal and the escalate signal. MRAC PID has proven to be able to maintain the level better than the decoupler when the load was given with 11% RMSE difference using unit step input. RMSE that obtained from the test with a unit step signal was 0.1cm for a phase-changing load and 0.18cm for exhaust holes-changing loads. An escalated level tracking test was performed and resulted in a 0.12cm RMSE for phase-changing load and 0.27cm for exhaust holes-changing loads.*

**Key Word** : *Quadruple Tank Plant, process control, decoupler, MRAC*

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*



## **KATA PENGANTAR**

*Alhamdulillah Robbil ‘Alamin*, segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul :

### **PERANCANGAN KOTROLER PID DENGAN MENGUNAKAN TEKNIK MRAC UNTUK MENGATUR LEVEL PADA QUADRUPE TANK**

Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi tahap sarjana pada bidang studi Teknik Sistem Pengaturan, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, antara lain :

1. Segenap keluarga tercinta, Sofwan Hidayat, Afifah, dan Muhammad Iqbal yang selalu memberi dukungan, semangat serta doa yang tiada henti untuk keberhasilan penulis.
2. Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT. dan Prof.Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D. selaku dosen pembimbing 1 dan dosen pembimbing 2 yang telah banyak memberikan saran dan bimbingan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Seluruh rekan Laboratorium B-405 dan Pengendalian Proses Departemen Teknik Kimia atas bantuan, dukungan, kebersamaan dan kerja samanya selama ini.
4. Rekan-rekan di Departemen PROKESMA SUPER yang paling berjasa dalam proses pengembangan diri saya di tahun ke-3. Fiona, Nanda, Velix, Fathan, Fauqi, Rusdy, Ahya, Fahmi, Rycha, Mila, Adit, Yakin, dan Agung.
5. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, sahabat-sahabat e-53 (2013), para dosen, karyawan, serta seluruh rekan HIMATEKTRO atas dukungan, masukan serta kerjasamanya sepanjang masa perkuliahan dan pengerjaan tugas akhir ini.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik, saran serta koreksi yang membangun dari pembaca untuk perbaikan di masa mendatang.

Surabaya, Desember 2016

Penulis



# DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii

## BAB 1

### PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Metodologi.....	3
1.5 Sitematika Penulisan .....	5
1.6 Relevansi.....	5

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pengaturan.....	7
2.2 Pengaturan Proses Level .....	8
2.2 Karakteristik Sistem.....	10
2.3 Kontroler PID.....	12
2.4 Quadruple Tank Plant.....	13
2.5 <i>Decoupling</i> .....	16
2.5 <i>Observability</i> .....	17
2.5.1 <i>State Observer</i> .....	18
2.6 Sistem Pengaturan Adaptif.....	21
2.7 <i>Model Adaptive Reference Control</i> MRAC .....	22
2.7.1 <i>MIT Rule</i> .....	23
2.8 <i>Root Mean Square Error</i> RMSE .....	24

## BAB 3

### PERANCANGAN SISTEM

3.1 Gambaran Umum Sistem .....	25
3.1 Pemodelan <i>Non-linear Quadruple Tank Plant</i> .....	25
3.2 <i>Decoupler Non-linear</i> .....	28
3.3 <i>State Observer</i> dengan MIMO <i>State Compensator</i> .....	32
3.4 Perancangan MRAC PID .....	35

## BAB 4

### PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem.....	43
4.2. Pengujian <i>Open Loop Quadruple Tank Plant</i> .....	43
4.2 Pengujian Performansi <i>Decoupler</i> .....	45
4.2.1 Pengujian Tanpa beban .....	45
4.2.2 Pengujian dengan Gangguan.....	46
4.2.3 Pengujian Berbeban Perubahan Fasa .....	48
4.2.4 Pengujian Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang .....	51
4.3 Pengujian <i>State Observer</i> .....	52
4.3.1 Pengujian Tanpa Beban .....	52
4.3.2 Pengujian Berbeban Perubahan Fasa .....	53
4.3.4 Pengujian Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang .....	55
4.4 Pengujian MRAC PID .....	56
4.4.1 Pengujian Tanpa Beban .....	56
4.4.1.1 Pengujian Tanpa Beban dengan Masukan Unit Step ...	56
4.4.1.2 Pengujian Tracking Naik Tanpa Beban .....	58
4.4.2 Pengujian Berbeban Perubahan Fasa .....	59
4.4.2.1 Pengujian Berbeban Perubahan Fasa dengan Masukan Unit Step.....	59
4.4.2.2 Pengujian Tracking Naik Berbeban Perubahan Fasa ...	61
4.4.3 Pengujian Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang Tangki 1 dan Tangki 2.....	62
4.4.3.1 Pengujian Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang dengan masukan Unit Step .....	62
4.4.3.2 Pengujian Tracking Naik Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang .....	63



## BAB 5

### PENUTUP

5.1 Kesimpulan .....	67
5.2 Saran .....	67

DAFTAR PUSTAKA .....	69
----------------------	----

BIOGRAFI PENULIS .....	71
------------------------	----

LAMPIRAN .....	73
----------------	----

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	<i>Flow chart</i> metodologi pelaksanaan studi .....	4
Gambar 2.1	Blok diagram sistem pengaturan .....	7
Gambar 2.2	Pengaturan proses level otomatis .....	9
Gambar 2.3	Blok diagram umum orde pertama .....	10
Gambar 2.4	Blok diagram umum orde kedua .....	10
Gambar 2.5	<i>Time Delay (a), Rise Time (b), Peak Time (c),</i> .....	12
Gambar 2.6	Kontroler PID .....	13
Gambar 2.7	<i>Quadruple Tank Plant</i> .....	15
Gambar 2.8	<i>Decoupler</i> .....	17
Gambar 2.9	<i>Full-order state observer</i> .....	20
Gambar 2.10	Mekanisme sistem pengaturan adaptif .....	21
Gambar 2.11	Diagram blok mekanisme MRAC .....	22
Gambar 3.1	Model matematis <i>non-linear quadruple tank</i> dalam simulink .....	27
Gambar 3.2	Model matematis <i>non-linear quadruple tank</i> yang dirangkum dalam satu <i>subsystem plant</i> .....	28
Gambar 3.3	<i>Decoupler</i> sistem <i>quadruple tank</i> .....	31
Gambar 3.4	<i>Subsystem decoupler</i> .....	31
Gambar 3.5	<i>Subsystem virtual plant</i> .....	32
Gambar 3.6	Diagram blok model matematis <i>virtual plant</i> .....	33
Gambar 4. 1	Respon keluaran tangki 1 terhadap masukan <i>step</i> .....	44
Gambar 4.2	Respon keluaran tangki 2 terhadap masukan <i>step</i> .....	44
Gambar 4.3	Respon keluaran tangki 1 dan tangki 2 dengan <i>decoupler</i> .....	45
Gambar 4.4	Respon keluaran tangki 1 dan tangki 2 sebelum diberi gangguan .....	46
Gambar 4.5	Respon Level tangki 1 saat tangki 2 diberi gangguan ..	47
Gambar 4.6	Respon Level tangki 2 saat tangki 1 diberi gangguan ..	48
Gambar 4.7	Perubahan $\gamma$ 1 .....	48
Gambar 4.8	Perubahan $\gamma$ 2 .....	49
Gambar 4.9	<i>Phase</i> dari <i>quadruple tank</i> .....	49
Gambar 4.10	Respon level tangki 1 dan 2 saat berbeban perubahan fasa .....	50
Gambar 4.11	Perubahan ukuran lubang tangki 1 dan tangki 2 .....	51

Gambar 4.12	Respon level tangki 1 dan tangki 2 dengan beban perubahan lubang .....	52
Gambar 4.13	Respon <i>error eh1</i> dengan <i>state compensator</i> .....	53
Gambar 4.14	Respon <i>error eh2</i> dengan <i>state compensator</i> .....	53
Gambar 4.15	Respon <i>error eh1</i> berbeban perubahan fasa .....	54
Gambar 4.16	Respon <i>error eh2</i> berbeban perubahan fasa .....	55
Gambar 4.17	Respon <i>error eh1</i> berbeban perubahan ukuran lubang .....	55
Gambar 4.18	Respon <i>error eh2</i> berbeban perubahan ukuran lubang .....	56
Gambar 4.19	Respon level tangki 1 untuk <i>tracking</i> sinyal <i>unit step</i> .....	57
Gambar 4.20	Respon level tangki 2 untuk <i>tracking</i> sinyal <i>unit step</i> .....	57
Gambar 4.21	Sinyal uji <i>tracking</i> naik.....	58
Gambar 4.22	Respon <i>tracking</i> level naik tangki 1 tanpa beban .....	59
Gambar 4.23	Respon <i>tracking</i> level naik tangki 2 tanpa beban .....	59
Gambar 4.24	Respon level tangki 1 untuk <i>tracking</i> sinyal <i>unit step</i> berbeban perubahan fasa.....	60
Gambar 4.25	Respon level tangki 2 untuk <i>tracking</i> sinyal <i>unit step</i> berbeban perubahan fasa.....	60
Gambar 4.26	Respon <i>tracking</i> level naik tangki 1 berbeban perubahan fasa .....	61
Gambar 4.27	Respon <i>tracking</i> level naik tangki 1 berbeban perubahan fasa .....	62
Gambar 4.28	Respon level tangki 1 untuk <i>tracking</i> sinyal <i>unit step</i> berbeban perubahan ukuran lubang buang .....	63
Gambar 4.29	Respon level tangki 2 untuk <i>tracking</i> sinyal <i>unit step</i> berbeban perubahan ukuran lubang buang .....	63
Gambar 4.30	Respon <i>tracking</i> level naik tangki 1 berbeban perubahan perubahan ukuran lubang buang .....	64
Gambar 4.31	Respon <i>tracking</i> level naik tangki 2 berbeban perubahan perubahan ukuran lubang buang .....	64



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Paremeter spesifikasi <i>plant</i> .....	28
Tabel 4.1	Karakteristik <i>transient</i> level dengan <i>decoupler</i> .....	46
Tabel 4.2	Karakteristik <i>transient</i> level tangki 1 saat tangki 2 terganggu.....	47
Tabel 4.3	Karakteristik <i>transient</i> level tangki 2 saat tangki 1 terganggu.....	47
Tabel 4.4	Karakteristik <i>transient</i> level tangki 1 dan tangki 2 dengan beban.....	50

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Semakin berkembangnya zaman, kebutuhan manusia akan barang hasil industri semakin meningkat. Namun meningkatnya kebutuhan akan barang hasil industri tidak diikuti dengan peningkatan kualitas sumber daya manusia yang menjadi rotor utama berjalannya proses pengolahan dan produksi di dalam suatu industri. Ketidakkonsistenan mutu kerja manusia dalam fungsi waktu juga menjadi salah satu penyebab ketidakefisienan yang terjadi di dunia industri. Otomasi industri pun menjadi satu satunya jalan keluar yang diambil demi mendapatkan hasil pemgolahan dan produksi yang maksimal dan tentunya efisien. Berbagai sektor industri mulai dari kimia, minyak dan gas, sampai otomotif berlomba lomba dalam mengembangkan teknologi pengaturan proses yang berjalan dalam industri mereka.

Pada dunia industri khususnya industri kimia, pengaturan proses adalah salah satu disiplin ilmu yang terpenting untuk diperhatikan demi berjalannya keseluruhan proses pengolahan maupun produksi. Pengaturan proses yang meliputi pengaturan aliran (*flow*), level, suhu (*temperature*) dan tekanan (*pressure*) selalu menjadi objek yang sering diteliti guna mendapatkan peformansi yang lebih handal dari sebelumnya, sehingga hasil yang maksimal dari proses industri pun dapat dicapai. Pengaturan proses dengan banyak variabel juga menjadi topik hangat dalam objek penelitian mengingat hanya sedikit proses pada industri yang menggunakan sistem satu masukan satu keluaran atau biasa disingkat SISO (Single Input Single Output). *Plant Quadruple Tank* dapat mendemontrasikan permasalahan yang timbul dalam pengaturan proses variabel banyak atau MIMO (Multi Input Multi Output) dalam lingkup laboratorium

*Quadruple Tank* digolongkan kedalam *plant* yang memiliki karakteristik *non-linier*, hal ini disebabkan karena adanya interaksi silang antara variabel masukan dan variabel keluaran pada masing-masing tangki.. Metode pengaturan variabel tunggal atau SISO tidak lagi dapat diterapkan pada pengaturan level *Quadruple Tank* dikarenakan karakteristik *non-linear* dan *multivariable* yang dimiliki oleh sistem *Quadruple Tank Quadruple Tank*.



Penelitian mengenai penerapan berbagai metode kontrol untuk mengatur level dari *Quadruple Tank* sudah banyak dilakukan, adapun metode metode yang dipakai adalah *predictive control*, *Fuzzy PID*, dan sebagainya. Penggunaan kontroler PID dengan menggunakan teknik MRAC telah dilakukan pada percobaan berjudul Design Of “*Model Reference Adaptive Control For A Quadruple Tank Using LabView*”. Dalam percobaan yang dilakukan oleh Xavier Christie tersebut, linearisasi dilakukan pada permodelan dinamik dari *Quadruple Tank* demi mencari nilai *Transfer Function*. Dalam penelitian kali ini, penulis akan mencoba untuk mempertahankan model matematis *non-linear* dari *Quadruple Tank* yang akan diintegrasikan dengan *Decoupling non-linear* untuk menghilangkan reaksi silang variabel antar tangki. Selain itu pembebanan juga diberikan kepada *plant Quadruple Tank* untuk menguji performansi kontroler yang telah dibuat.

## 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini meliputi:

1. Strategi pengaturan proses level untuk mengkompensasi karakteristik ketidaklinieran *multivariable Quadruple Tank Plant*
2. Perancangan MRAC sebagai bentuk model referensi yang mengevaluasi berubahnya parameter kontrol dengan teori *MIT Rule*
3. Keandalan dari hasil perancangan kontroler PID dengan teknik MRAC terhadap pembebanan dalam perubahan parameter *plant*

## 1.3 Tujuan

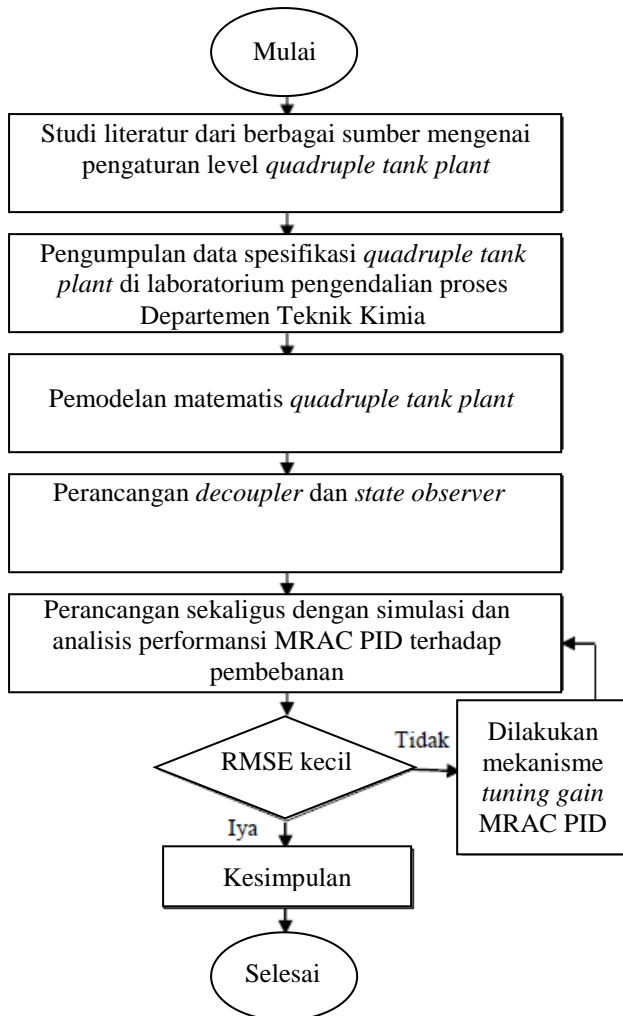
Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah:

1. Melakukan studi mengenai pengaturan proses *multivariable* atau MIMO dengan menggunakan *Quadruple Tank* sebagai objek penelitian.
2. Melakukan perancangan kontroler PID dengan teknik MRAC untuk mencapai keandalan pengaturan level *Quadruple Tank* terhadap perubahan parameter kontrol yang disebabkan pembebanan
3. Melakukan analisa keandalan kontroler PID MRAC untuk mengkompensasi perubahan parameter atau pembebanan.

## 1.4 Metodologi

Dalam melakukan proses penelitian, dilakukan tahapan pengerjaan sebagai berikut:

1. Studi literatur dan Pengumpulan Data  
Melakukan pengumpulan data-data yang dibutuhkan dalam tugas akhir ini yang berupa spesifikasi fisik *Quadruple Tank Plant* di laboratorium Pengendalian Proses Departemen Teknik Kimia ITS yang mana meliputi diagram fisik, luas alas dan luas penampang jalur keluaran masing-masing tangki, dan konstanta gain pompa.
2. Pemodelan Matematik Persamaan Dinamis *Plant*  
Memodelkan persamaan dinamis *plant* ke dalam persamaan matematika non linier guna melihat karakteristik *plant* dalam grafik fungsi waktu dengan menggunakan perangkat lunak Matlab.
3. Perancangan *Decoupler Non-linear*  
Merancang *Decoupler Non-linear* untuk menghilangkan interaksi silang yang terjadi di antara masing-masing tangki guna memudahkan analisa dan perancangan kontroler yang tepat.
4. Perancangan *Model Reference Adaptive Control*  
Melakukan perancangan *model reference adaptive control* yang ditujukan untuk menjaga keandalan kontroler pada saat dilakukan uji coba *tracking* (perubahan *set point*) dan pembebanan berupa perubahan parameter-parameter *plant*. Perancangan MRAC dilakukan dengan menggunakan metode *MIT Rule*.
5. Kesimpulan dan Saran  
Penarikan kesimpulan mengacu pada data pengujian, analisis data, dan referensi terkait. Kesimpulan menunjukkan hasil kerja secara garis besar sesuai rumusan masalah yang telah dibuat. Selanjutnya penarikan saran juga perlu dilakukan sebagai bentuk koreksi terhadap penelitian yang telah dilakukan dan pengembangan penelitian selanjutnya.
6. Penyusunan Buku  
Tahap ini merupakan tahap akhir dari serangkaian pelaksanaan tugas akhir, Penyusunan tugas akhir dilakukan sebagai bentuk buku laporan tertulis dari proses dan hasil kerja terkait topik yang diusulkan.



**Gambar 1.1** *Flow chart* metodologi pelaksanaan studi

Gambaran sederhana mengenai *flow chart* dari metodologi yang akan dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1.1 diatas.



## 1.5 Sitematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini akan dibagi menjadi lima bab dengan uraian sebagai berikut:

**Bab I : Pendahuluan**

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.

**Bab II : Tinjauan Pustaka**

Bab ini membahas teori penunjang pemodelan matematik non-linear *quadruple tank plant*, karakteristik system, *decoupler*, *state observer* dan kontroler MRAC PID.

**Bab III : Perancangan Sistem**

Bab ini membahas langkah-langkah perancangan sistem pengaturan level *quadruple tank plant* menggunakan MRAC PID secara keseluruhan. Komponen-komponen penyusun sistem juga dijelaskan dengan detail.

**Bab IV : Pengujian dan Analisis Sistem**

Bab ini membahas tentang pengujian dan analisis dari hasil simulasi yang dilakukan, meliputi pengujian performansi masing-masing komponen sistem dan pengujian performansi kontroler MRAC PID terhadap pembeban yang diberikan.

**Bab V : Kesimpulan**

Bab ini membahas tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

## 1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan memberi manfaat sebagai berikut:

1. Digunakan sebagai referensi bagi laboratorium Pengendalian Proses jurusan Teknik Kimia dalam mengimplementasikan berbagai metode kontrol pada *quadruple tank plant*.
2. Digunakan sebagai acuan mengenai studi sistem pengaturan *multivariable* bagi mahasiswa yang akan mengerjakan tugas akhir dengan permasalahan serupa.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

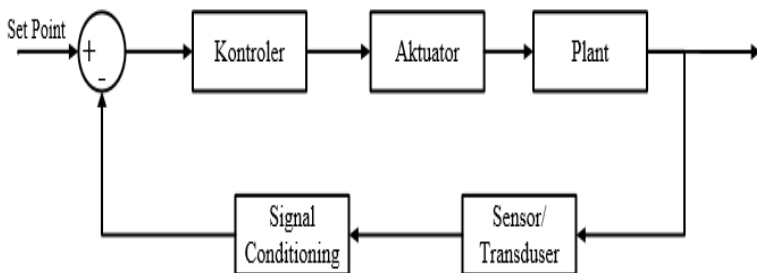
## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

Kegiatan tugas akhir yang meliputi penelitian dan perancangan metode kontrol didasarkan pada penelitian-penelitian yang telah ada. Hal ini dimaksudkan untuk melanjutkan atau menyempurnakan beberapa aspek yang masih dianggap layak untuk diangkat menjadi topik penelitian. Pada bab ini akan dijelaskan beberapa materi yang dijadikan penunjang dan landasan oleh penulis dalam melaksanakan penelitian maupun memperkuat argumen. Adapun beberapa materi yang dibahas adalah sistem pengaturan, pengaturan proses level, karakteristik sistem, kontroler PID, *quadruple tank plant*, dan MRAC.

#### 2.1 Sistem Pengaturan

Untuk mendefinisikan apa itu sistem pengaturan, perlu dipahami terlebih dahulu masing-masing kata penyusunnya yaitu “sistem” dan “pengaturan”. Sistem adalah sekumpulan komponen-komponen yang berjalan sesuai fungsinya masing-masing namun terhubung satu sama lain untuk mencapai suatu tujuan. Sedangkan pengaturan/kendali/kontrol adalah sekumpulan *rule*/algoritma/formasi yang mengkoordinir atau merelasikan komponen-komponen penyusun sistem sedemikian rupa sehingga perilaku dinamis/performansi sistem memenuhi spesifikasi tertentu atau dalam kata lain sesuai dengan tujuan desain. Maka sistem pengaturan dapat diartikan sebagai suatu kumpulan komponen yang mana kerja dan relasi antar komponen ditentukan oleh *rule*/algoritma/formasi demi mencapai tujuan dari sistem yang diinginkan.



**Gambar 2.1** Blok diagram sistem pengaturan

Blok diagram yang ditunjukkan pada gambar 2.1 diatas adalah salah satu struktur yang paling umum digunakan untuk merepresentasikan laju pengaturan suatu sistem. *Set point* adalah suatu nilai yang diinginkan untuk dicapai oleh sistem yang diatur. *Set point* dapat ditemukan dalam berbagai satuan, baik itu suhu, level cairan, kecepatan, posisi bergantung dari kegunaan dari sistem yang diatur itu sendiri. Kontroler adalah komponen yang memegang peranan terpenting dalam keseluruhan sistem pengaturan. Mengolah dan memanipulasi sinyal kontrol berdasarkan perbedaan *Set Point* dengan kondisi keluaran pada waktu tertentu adalah fungsi yang dijalankan kontroler. Sinyal kontrol yang dihasilkan dari pengolahan sinyal *error* dengan formulasi kontrol tertentu selanjutnya akan dikirim ke aktuator. Aktuator atau yang biasa disebut dengan *final control element* adalah perangkat yang berhubungan langsung dengan *plant* yang ingin diatur, atau dalam kata lain aktuator berfungsi merealisasikan sinyal kontrol yang diberikan oleh kontroler sebelumnya.

Dalam disiplin ilmu sistem pengaturan, *plant* adalah nama lain dari sistem yang mana dapat diartikan sebagai setiap objek fisik yang diatur. *Plant* adalah seperangkat peralatan yang mungkin hanya terdiri dari beberapa komponen mesin yang bekerja bersama-sama dan digunakan untuk mendapatkan tujuan tertentu, seperti pemanas, penyimpanan air, pendingin, dan lain sebagainya. Nilai keluaran yang dihasilkan oleh *plant* akan diukur oleh sensor akan dibandingkan dengan nilai *set point* untuk melihat besarnya *error*. Besarnya nilai *error* akan menentukan pengambilan keputusan kontrol oleh kontroler.

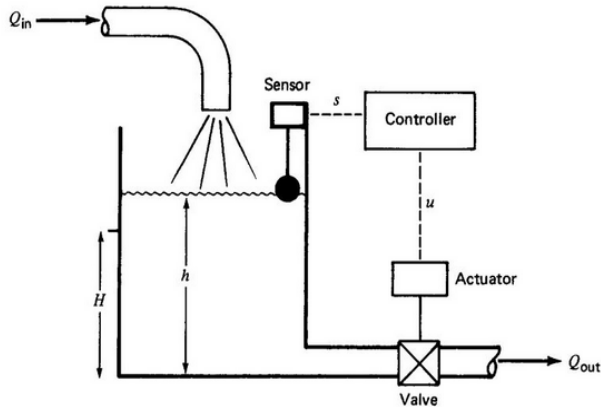
Dalam sistem pengaturan, terdapat tiga parameter utama yang diperhitungkan, yaitu *Set Value* (SV), *Manipulated Value* (MV), dan *Process Value* (PV). *Set Value* adalah nilai parameter yang diharapkan dapat dicapai oleh *plant*, dalam kata lain *Set Value* adalah nama lain dari *Set Point*. *Manipulated Value* atau dapat disebut juga sebagai sinyal kontrol, adalah sinyal yang dihasilkan dari respon kontroler terhadap *error*, sedangkan *Process Value* adalah nilai dari keadaan *plant* pada suatu waktu yang akan dibandingkan dengan *Set Point* untuk menghasilkan nilai dari *error*.

## 2.2 Pengaturan Proses Level[1]

Untuk mengolah bahan baku menjadi barang yang dapat dijual oleh setiap jenis industri, perlu dilakukan serangkaian strategi pengaturan untuk menjaga keseluruhan proses produksi dapat berjalan sesuai dengan prosedur. Hal yang diatur dapat berupa suhu, tekanan, laju aliran,



ketinggian air, dan sebagainya. Pengaturan proses adalah disiplin ilmu yang berhubungan dengan arsitektur, mekanisme, dan algoritma untuk menjaga keluaran *plant* produksi yang diatur selalu dalam rentang nilai yang diinginkan.



**Gambar 2.2** Pengaturan proses level otomatis

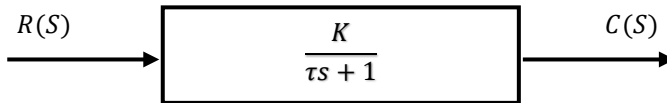
Gambar 2.2 adalah salah satu contoh dari pengendalian proses, yaitu pengendalian level air pada tangki. Air memasuki tangki melalui pipa dengan laju aliran  $Q_{in}$  dan air mengalir keluar dari tangki dengan laju aliran  $Q_{out}$ . Ketinggian air di dalam tangki di notasikan  $H$ . Besar laju aliran air yang keluar dapat dicari dengan hukum bernoulli dan menghasilkan persamaan  $Q_{out} = K\sqrt{H}$ , sehingga semakin tinggi level air di dalam tangki, maka semakin cepat pula air yang keluar.

Dalam mempertahankan level air di dalam tangki, sensor level digunakan untuk memberikan pembacaan nilai level air di dalam tangki. Ketinggian air di dalam tangki dapat disebut sebagai variabel yang diatur atau *controlled variable*. Laju aliran air yang keluar  $Q_{out}$  disebut sebagai variabel yang dimanipulasi atau *manipulated variable / controlling variable*. Valve digunakan untuk mengatur besarnya laju aliran air yang keluar, yang mana valve sendiri terdiri dari dua jenis, yaitu valve yang dikendalikan oleh aktuator menggunakan sistem pneumatik dan sistem elektrik. Sistem pneumatik menggunakan konverter untuk mengubah sinyal kontrol elektrik menjadi sinyal pneumatik, Namun jenis valve yang digunakan pada penelitian *quadruple tank* adalah valve berjenis elektrik.

## 2.2 Karakteristik Sistem[2]

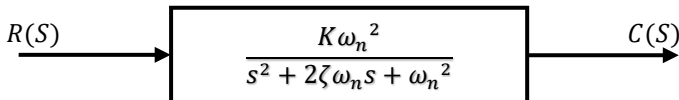
Karakteristik sistem merupakan ciri-ciri khusus dari respon output sistem, yang karena ciri-ciri khusus ini disebut pula sebagai spesifikasi peformansi sistem. Untuk melihat kualitas sistem dapat dilakukan pengujian dengan mengamati respon output dari sistem terhadap beberapa macam masukan yang khas. Sistem yang berkenaan pada tugas akhir ini adalah respon sistem orde pertama dan kedua. Analisis sistem orde pertama dilakukan pada *decoupler*. Sedangkan analisis sistem orde kedua dilakukan karena kontroler yang dirancang untuk mengendalikan *plant Quadrule Tank* adalah kontroler PID.

Karakteristik respon waktu untuk waktu sistem orde pertama terbilang sangat sederhana. Parameter sistem orde pertama yang kerap kali jadi dasar analisis adalah *time constant* ( $\tau$ ). Waktu yang dibutuhkan oleh respon sistem untuk mencapai nilai 0,632 dari *set point* disebut waktu tunak atau *time constant* ( $\tau$ ). Adapun diagram blok umum dari sistem orde pertama tertera pada Gambar 2.3



**Gambar 2.3** Blok diagram umum orde pertama

Karakteristik respon waktu untuk waktu sistem orde kedua diberikan berdasarkan respon sistem terhadap masukan sinyal step. Karakteristik respon waktu sistem orde kedua dibedakan menjadi karakteristik respon transien dan karakteristik respon keadaan tunak atau *steady state*. Diagram blok dan fungsi alih dari sistem orde kedua dapat dilihat di Gambar 2.4 berikut.



**Gambar 2.4** Blok diagram umum orde kedua

$$\frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.1)$$

dengan

$K$  : *Gain overall*

$\omega_n$  : Frekuensi alami tak teredam

$\zeta$  : Rasio peredaman

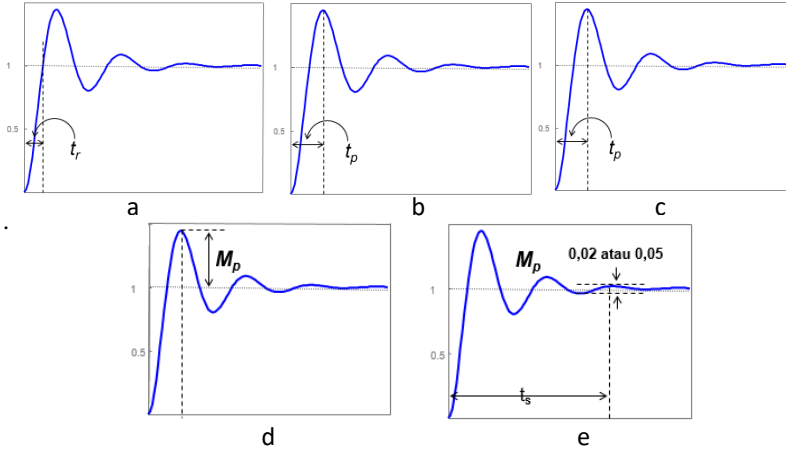
Bedasarkan fungsi alih loop tertutupnya dapat kita lihat bahwa kelakuan dinamik sistem orde kedua dapat digambarkan dengan parameter  $\omega_n$  dan  $\zeta$ . Ada beberapa variabel yang dapat diperhatikan dan dimanipulasi demi melakukan perancangan sistem orde dua. Adapun spesifikasi praktis sistem orde dua tervisualisasi di Gambar 2.5 dan terdiri dari:

1. Waktu tunda (*delay time*),  $t_d$  Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan oleh respon untuk mencapai setengah dari nilai *steady state* tunak untuk waktu pertama
2. Waktu naik (*rise time*),  $t_r$   
Waktu naik adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk naik dari 5% ke 95% atau 10% ke 90% dari nilai *steady state*
3. Waktu puncak (*peak time*),  $t_p$   
Waktu puncak adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak pertama *overshoot*
4. *Overshoot* maksimum,  $M_p$   
*Overshoot* maksimum adalah nilai puncak kurva respon dikukur dari satuan. Apabila nilai akhir keadaan tunak responnya jauh lebih dari satu, maka biasa digunakan persen *overshoot* maksimum, dan didefinisikan oleh

$$\text{Maksimum (persen) overshoot} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

Besarnya persen *overshoot* maksimum menunjukkan kestabilan relatif dari sistem

5. Waktu tunak (*settling time*),  $t_s$   
Waktu tunak adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai kestabilan stabil (keadaan tunak) atau dianggap stabil.



**Gambar 2.5** Time Delay (a), Rise Time (b), Peak Time (c), Maximum Peak (d), Settling Time (e)

### 2.3 Kontroler PID[2]

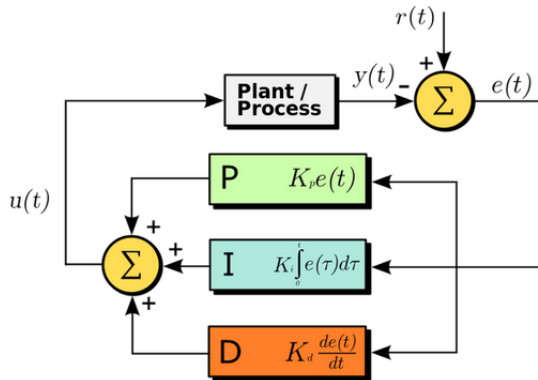
Kontroler PID adalah kontroler tipe *direct processing control* yang berfungsi mengolah sinyal *error* menjadi sinyal kontrol dimana hubungan sinyal *error* dengan sinyal kontrol berupa proporsional + derivatif + integral (PID). Parameter kontroler  $K_p$  (*gain proportional*),  $\tau_i$  (*time integral*) dan  $\tau_d$  (*time differential*) dihitung sedemikian rupa sehingga respon sistem hasil desain memenuhi spesifikasi respon waktu tertentu. Blok diagram dari kontroler PID dapat dilihat di Gambar 2.6.

$$U(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t)dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2.2)$$

$$U(s) = K_p[e(s) + \frac{1}{\tau_i s} e(s) + \tau_d s e(s)] \quad (2.3)$$

$$\frac{U(s)}{C(s)} = K_p[1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s] \quad (2.4)$$





**Gambar 2.6** Kontroler PID

**Tabel 2.1** Respon masing masing variabel kontrol PID

Respon loop Tertutup	<i>Rise Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Steady-state Error</i>
P	Turun	Naik	Berubah Kecil	Turun
I	Turun	Naik	Naik	Eliminasi
D	Berubah Kecil	Turun	Turun	Berubah Kecil

## 2.4 Quadruple Tank Plant[3&4]

Proses *Quadruple Tank* adalah salah satu proses di tingkat laboratorium yang sangat dikenal luas sebagai objek studi dan penelitian mengenai sistem *multivariable* atau MIMO. *Quadruple tank* terdiri dari dua buah pompa dan empat tangki yang saling terhubung dalam sebuah sistem.  $v_1$  dan  $v_2$  (voltase yang diberikan ke pompa), (0-10V) adalah masukan sedangkan  $Y_1$  dan  $Y_2$  (voltase yang dihasilkan dari pembacaan sensor level), (0-10V) adalah keluaran dari *quadruple tank*. Tujuan pengaturan proses *quadruple tank* adalah untuk menjaga ketinggian air di dua tangki bawah.

Dalam sistem QTP, pompa terhubung dengan tangki 1, tangki 2, tangki 3, dan tangki 4. Pompa 1 akan mengisi tangki 1 dan tangki 4, sedangkan pompa 2 bertugas mengisi tangki 2 dan tangki 3. Tangki-tangki yang terdapat pada sistem QTP saling berinteraksi dalam hal masukan dan keluaran. Air dari keluaran tangki 3 akan menjadi masukan tangki 1, sedangkan keluaran tangki 4 akan menjadi masukan tangki 2. Interaksi masukan keluaran antar tangki inilah yang menyebabkan sistem QTP memiliki karakteristik *non-linear*.

Pemodelan matematika dari sistem dinamik QTP dapat dilakukan dengan penurunan rumus neraca kesetimbangan massa.

$$\frac{\text{Akumulasi total massa}}{\text{waktu}} = \frac{\text{total massa masukan}}{\text{waktu}} - \frac{\text{total massa keluaran}}{\text{waktu}}$$

$$\frac{dm_T}{dt} = m_{in} - m_{out} \quad (2.5)$$

dimana:

$m_T$  : massa terakumulasi di dalam tangki (volume tangki( $v$ ) \* massa jenis cairan di dalam tangki( $\rho$ ))

$m_{in}$  : laju aliran massa masukan (laju aliran volumetrik( $q_{in}$ ) \* massa jenis cairan di dalam tangki( $\rho_1$ ))

$m_{out}$  : laju aliran massa keluaran (laju aliran volumetrik( $q_{out}$ ) \* massa jenis cairan di dalam tangki( $\rho_2$ ))

$$\frac{d\rho v}{dt} = \rho_1 q_{in} - \rho_2 q_{out} \quad (2.6)$$

Karena liquid yang beredar disemua tangki sama, maka  $\rho = \rho_1 = \rho_2$ .

Mengingat volume = luas alas \* tinggi, maka persamaan menjadi:

$$\frac{d\rho v}{dt} = \rho_1 q_{in} - \rho_2 q_{out} \quad (2.7)$$

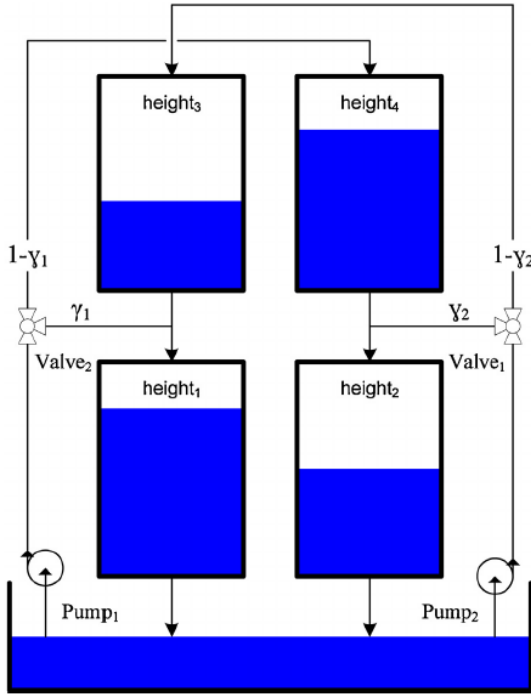
dimana:

$A$  : luas alas dari tangki,  $\text{cm}^2$

$h$  : ketinggian air di dalam tangki,  $\text{cm}$

$q_{in}$  : laju aliran air masuk tangki,  $\text{cm}^3$

$q_{out}$  : laju aliran air keluar tangki,  $\text{cm}^3$



**Gambar 2.7** *Quadraple Tank Plant*

Untuk menentukan hubungan antara laju aliran keluar dengan ketinggian, digunakan hukum Bernoulli yang menyatakan:

$$q_{out} = a\sqrt{2gh} \quad (2.8)$$

dimana:

$a$  : luas lubang saluran air keluar,  $\text{cm}^2$

$g$  : percepatan gravitasi

Dengan menyatukan semua persamaan yang telah diurunkan diatas, maka didapatkan persamaan matematis dari setiap tangki pada sistem QTP:

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = -a_1\sqrt{2gh_1} + a_3\sqrt{2gh_3} + \gamma_1 k_1 v_1 \quad (2.9)$$

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = -a_2\sqrt{2gh_2} + a_4\sqrt{2gh_4} + \gamma_1 k_2 v_2 \quad (2.10)$$

$$A_3 \frac{dh_3}{dt} = -a_3 \sqrt{2gh_3} + (1 - \gamma_2)k_2 v_2 \quad (2.11)$$

$$A_4 \frac{dh_4}{dt} = -a_4 \sqrt{2gh_4} + (1 - \gamma_1)k_1 v_1 \quad (2.12)$$

dimana:

$\gamma$  : rasio terbukanya valve untuk pembagian laju alir

$k$  : konstanta gain pompa

$\gamma$  dapat diatur secara manual pada sistem QTP, namun berdasarkan letak zeros dari fungsi transfer yang merupakan hasil linearisasi persamaan *non-linear* sistem QTP, rasio  $\gamma$  dapat dibedakan menjadi dua mode yaitu:

1. fase *Non-minimum* (tidak semua zeros terletak di sebelah kiri sumbu imajiner pada bidang s)  
 $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$
2. fase *minimum* (semua zeros terletak di sebelah kiri sumbu imajiner pada bidang s)  
 $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$

## 2.5 Decoupling[5]

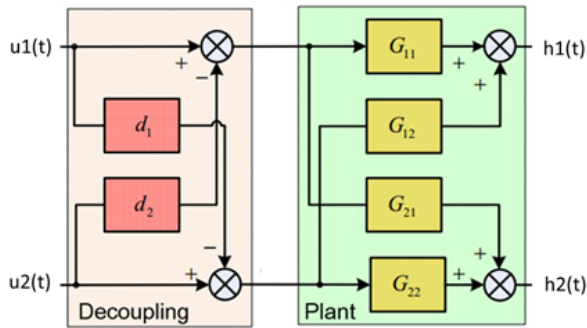
Proses *quadruple tank* adalah proses yang memiliki banyak *input* dan banyak *output* atau dapat disebut sistem MIMO. Karakteristik ini mengakibatkan adanya interaksi silang antar tangki, yang mana interaksi yang diperhatikan pada kasus penelitian ini adalah interaksi antara tangki 1 dan tangki 2 (dua tangki di bawah). Akan timbul kesulitan saat dilakukan perancangan sistem pengaturan untuk mengatur ketinggian air di kedua tangki tersebut bila interaksi yang ada tetap dipertahankan.

*Decoupler* dirancang sedemikian rupa dengan tujuan menghilangkan interaksi yang terjadi di antara kedua tangki, atau dengan kata lain *decoupler* dapat mengubah sistem MIMO menjadi dua buah sistem SISO. *Set point* yang diberikan pada tangki 1 tidak akan berpengaruh dan mengganggu keadaan di tangki 2 walau kedua tangki diberi *set point set point* yang berbeda dalam waktu yang bersamaan dan berlaku sebaliknya.

Untuk mengurangi interaksi yang terjadi di *control loop* masing-masing tangki 1 dan tangki 2, pada *multiloop* konvensional dapat kita tambahkan *decoupler*. *Decoupler* dirancang dan dipertimbangkan untuk seolah olah memaksa menghilangkan interaksi silang antara tangki 1 dan tangki 2. Tidak berhenti di situ, *decoupler* juga berfungsi sekaligus

berperan dalam menglinearisasikan respon sistem *non-linear* dari *quadruple tank plant*. Adapun keuntungan yang didapatkan dari penggunaan *decoupler* adalah:

1. Hilangnya interaksi yang terjadi antara *control loop input* yang mengakibatkan kestabilan *closed loop* sistem *quadruple tank* ditentukan oleh karakteristik *feedback linearization* yang diinginkan.
2. Pemberian *set point* pada salah satu tangki tidak akan mempengaruhi respon sistem tangki lain walau dalam waktu yang bersamaan diberikan nilai *set point* yang berbeda.



**Gambar 2.8** *Decoupler*

## 2.5 Observability[6]

Suatu sistem dikatakan terobservasi secara sempurna bila semua variabel kondisi keluaran (*state*)  $x(t)$  sistem tersebut dapat ditentukan dari observasi keluaran sistem  $y(t)$  dalam rentang waktu terbatas,  $t_0 \leq t \leq t_1$ . Bila setiap transisi dari variabel kondisi keluaran sistem memberi pengaruh pada setiap elemen vektor keluaran, maka sistem tersebut dapat pula dikatakan sebagai sistem yang terobservasi sempurna. Konsep dari observabilitas digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam mencari variabel keluaran yang tidak terukur berdasarkan variabel keluaran lain yang terukur dalam rentang waktu semininimum mungkin.

Untuk mempermudah penjelasan, maka diberikan suatu sistem yang terdiskripsi dalam bentuk:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.13)$$

$$y = Cx \quad (2.14)$$

Untuk menentukan apakah suatu sistem memiliki sifat dapat terobservasi dengan sempurna adalah dengan cara melihat *rank* dari matriks berukuran  $n \times n$

$$[C^*|A^*C^*| \dots |(A^*)^{n-1}C^*] \quad (2.15)$$

Suatu sistem dapat dikatakan sebagai sistem yang memiliki sifat terobservasi jika dan hanya jika matriks diatas memiliki *rank*  $n$  atau memiliki vektor kolom sejumlah  $n$  yang independen secara linear. Bila diberikan contoh suatu sistem:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (2.16)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

maka cara untuk menentukan apakah sistem tersebut memiliki sifat dapat terobservasi atau tidak adalah dengan cara mencari matriks:

$$[C^*|A^*C^*] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Matriks  $[C^*|A^*C^*]$  memiliki *rank* 2, maka sistem dapat dikatakan sebagai sistem yang memiliki sifat dapat terobservasi.

### 2.5.1 State Observer

Dalam melakukan pembelajaran mengenai perancangan sistem pengaturan, seringkali selalu diasumsikan bahwa variabel kondisi keluaran (*state*)  $x(t)$  dari sistem yang dikontrol dapat diperoleh dari keluaran sistem  $y(t)$ . Pada kenyataanya, tidak semua variabel kondisi keluaran sistem yang dikontrol dapat diperoleh karena tidak terdapatnya sensor untuk membaca sebagian keluaran pada keseluruhan sistem. Bila kondisi ini terjadi pada sistem yang ingin dikontrol, maka perlu digunakannya sebuah komponen dalam sistem yang dapat mengestimasi keluaran sistem yang tidak terukur, atau dalam kata lain membuat komponen yang bekerja sebagai sensor *virtual*.

Di saat sebuah sistem tidak dapat menghasilkan pembacaan semua variabel kondisi keluaran sistem  $x(t)$ , maka perlu dilakukannya pengestimasian variabel keluaran yang tidak tersedia. Pengestimasian



variabel keluaran yang tidak terukur disebut dengan observasi, sedangkan perangkat atau program komputer yang melakukan estimasi disebut dengan *state observer*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *state observer* harus digunakan disaat tidak semua variabel kondisi keluaran (*state*) sistem dapat terukur. Dalam merancang suatu sistem pengaturan terutama sistem pengaturan yang menggunakan mekanisme *state feedback*, variabel kondisi keluaran adalah sesuatu yang sangat penting bagi kontroler untuk menentukan langkah kontrol selanjutnya. Selain itu variabel kondisi keluaran memiliki pengaruh langsung terhadap dinamisasi perubahan keluaran sistem. Oleh karena itu, perancangan *state observer* adalah sesuatu yang sangat penting demi menjamin berjalannya sistem.

Sebuah *State observer* bekerja dengan cara mengestimasi variabel kondisi keluaran sistem berdasarkan variabel kontrol dan variabel kondisi keluaran lainnya yang terukur pada sistem yang sama. Perlu digarisbawahi bahwa perancangan dan penggunaan *state observer* pada suatu sistem hanya dapat dilakukan jika kondisi observabilitas sistem terpenuhi. *State observer* dapat disimpulkan sebagai komponen sistem yang memiliki model matematika yang sama persis dengan model matematika yang terdapat pada *plant* utama, hanya saja dirangkai dengan sebuah *state error compensator* untuk mengkompensasi *error*.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.19)$$

$$y = Cx \quad (2.20)$$

Persamaan diatas adalah persamaan dari *plant* yang nyata/*real*, yang mana  $x$  adalah variabel kondisi keluaran yang terukur oleh sensor. Sedangkan variabel kondisi keluaran yang terestimasi oleh *state observer* dinotasikan dengan  $\hat{x}$  dan dapat dicari dengan persamaan:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_e(y - C\hat{x}) \quad (2.21)$$

dimana:

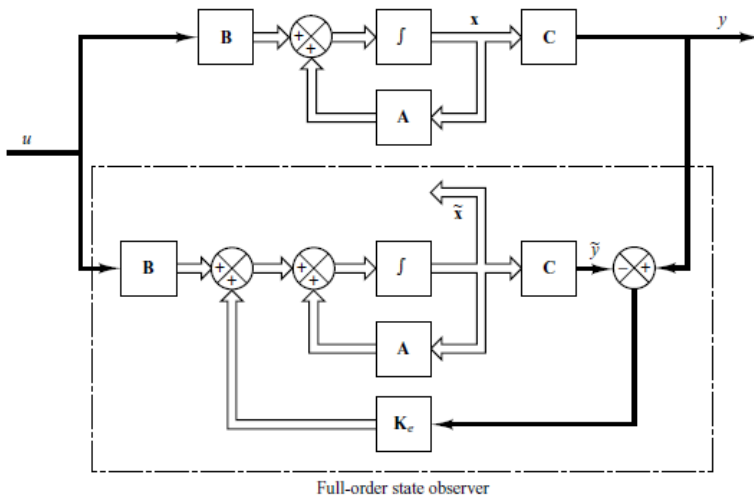
$K_e$  = *state error compensator*

$y$  = keluaran sistem

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa *state observer* adalah komponen sistem yang memiliki model matematika yang sama persis dengan *plant* utama dan dirangkai dengan sebuah *state error compensator*, maka sebuah *state observer* dapat dikatakan komponen yang terdiri dari *virtual plant* dan *state error compensator*.

Mekanisme kerja dari sebuah *state observer* adalah mengkomparasi perbedaan nilai keluaran yang terukur oleh sensor pada *real plant* dan *virtual plant*. Selisih antara nilai keluaran *real plant* dengan *virtual plant* disebut dengan *error*, yang mana *error* tersebut harus diusahakan sedemikian rupa agar bernilai mendekati nol. Untuk menghasilkan selisih antara keluaran *real plant* dengan *virtual plant* pada saat pertama kali sistem dijalankan, dapat diberikan perbedaan antara parameter matriks A atau B yang terdapat pada *real plant* dan *virtual plant* atau dapat pula diberikan *initial condition* yang berbeda antara kedua *plant*.

Setelah didapatkan *error*, selanjutnya *state error compensator* akan berfungsi sebagai komponen yang memanipulasi agar *error* bernilai sedekat mungkin dengan nol. Pemilihan *gain* atau fungsi transfer yang terdapat di dalam *state error compensator* memegang peranan penting untuk menentukan keandalan respon *error* agar bernilai mendekati nol. Bila nilai dari *error* sudah sedekat mungkin dengan nol, maka variabel kondisi keluaran (*state*) sistem yang sebelumnya tidak dapat dihasilkan oleh *real plant*, dapat diperoleh dari *virtual plant*. Sehingga dalam kata lain, variabel kondisi keluaran sistem yang tidak dapat terukur karena tidak terdapatnya sensor dapat ditanggulangi oleh sebuah *state observer*.



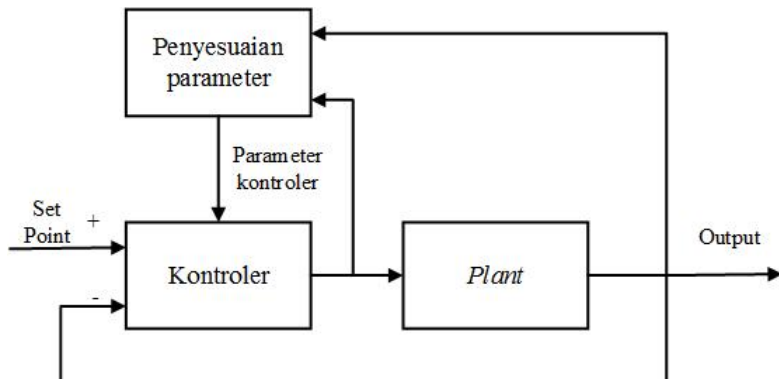
**Gambar 2.9** Full-order state observer

## 2.6 Sistem Pengaturan Adaptif[7]

Semua sistem yang ada memiliki karakteristik khusus yang menjadi pembeda antara satu sistem dengan sistem yang lain. Parameter-parameter yang dimiliki oleh sebuah sistem pasti tidak sama dengan parameter-parameter yang dimiliki oleh sistem lainnya. Berbeda dengan variabel yang nilainya berubah-ubah demi mendapatkan respon sistem sesuai peformansi hasil desain, parameter memiliki nilai yang cenderung tetap. perancang kontroler yang mengatur sebuah sistem, menjadikan parameter parameter sistem sebagai acuan dan landasan untuk mendesain kontroler yang tepat.

Namun sifat parameter yang cenderung bernilai tetap tidak menjamin bahwa nilai dari parameter dari suatu sistem akan selalu bernilai tetap selamanya. Lingkungan tempat sistem berjalan memegang peranan besar dalam menentukan ketetapan nilai parameter. Temperatur, usia, posisi, dan lain sebagainya seringkali memaksa nilai parameter dari suatu sistem berubah. Oleh karena itu perlu adanya sebuah kontroler yang dapat mengkompensasi perubahan dari nilai parameter sehingga keberlangsungan jalannya sistem dapat terjaga.

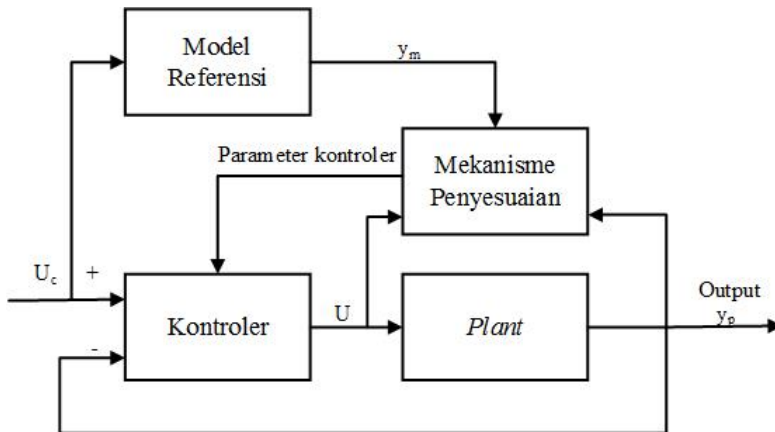
Sesuai dengan namanya “adaptif”, sistem pengaturan adaptif memiliki kemampuan beradaptasi terhadap perubahan-perubahan nilai parameter sistem. Sistem pengaturan adaptif mampu mengkompensasi perubahan parameter demi mempertahankan spesifikasi desain sistem dengan cara mengubah-ubah parameter kontroler.



**Gambar 2.10** Mekanisme sistem pengaturan adaptif

## 2.7 Model Adaptive Reference Control MRAC[7]

*Model Adaptive Reference Control* biasa digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang mana spesifikasi performansinya diberikan dalam bentuk model referensi. Model ini menjelaskan bagaimana semestinya keluaran proses merespon sinyal perintah. Diagram blok dapat dilihat pada gambar 2.7, kontroller dapat dikatakan terdiri dari dua *loop*. *Loop* dalam adalah *feedback* yang sebagaimana mestinya terdiri dari proses/*plant* dan kontroller. *Loop* luar mengatur parameter kontroller sebagaimana rupa agar error (perbedaan nilai keluaran proses  $y$  dan  $y_m$ ) terbilang kecil. MRAC biasa digunakan pada *flight control*. Pada kasus ini, model referensi dijelaskan sebagai respon pesawat yang diinginkan terhadap pergerakan *joystick*.



**Gambar 2.11** Diagram blok mekanisme MRAC

Kunci permasalahan dari MRAC adalah menentukan mekanisme pengaturan sehingga sistem tetap stabil, yang mana kondisi error sama dengan nol diraih. Permasalahan ini adalah *nontrivial*. Mekanisme penyesuaian parameter bekerja berdasarkan *error feedback* yang mana adalah perbedaan antara keluaran model referensi dan keluaran sistem. dibawah ini disebut dengan MIT Rule, yang mana digunakan pada standar MRAC.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\delta e}{\delta \theta} \quad (2.22)$$

Pada persamaan ini,  $e = y - y_m$  mensimbolkan error pada model, dan  $\theta$  adalah parameter kontroller. Jumlah  $\frac{\delta e}{\delta \theta}$  adalah turunan sensitifitas error terhadap parameter  $\theta$ . Parameter  $\gamma$  menunjukkan laju adaptasi. Pada praktiknya, penting untuk membuat perkiraan untuk mendapatkan turunan sensitifitas. MIT rule dapat dikatakan sebagai skema gradien untuk meminimalisasi error kuadrat  $e^2$

### 2.7.1 MIT Rule

*MIT Rule* adalah salah satu pendekatan untuk MRAC. Penggunaan *MIT Rule* dikarenakan metode ini ditemukan dan dikembangkan di laboratorium instrumentasi di MIT. Untuk melakukan *MIT rule*, perlu dilakukan penentuan sistem *loop* tertutup dimana kontrolernya punya satu parameter yang dapat diatur  $\theta$ . Respon yang diinginkan dari sistem *loop* tertutup ditentukan oleh model yang mana keluarannya berupa  $y_m$ .  $e$  adalah *error* antara keluaran sistem  $y_p$  dengan dengan keluaran model  $y_m$ . Satu kemungkinan untuk mengatur parameter adalah dengan menjadikan fungsi rugi

$$J(\theta) = \frac{1}{2}e^2 \quad (2.23)$$

seminimal mungkin. untuk membuat  $J$  seminimal mungkin, maka dilakukan perubahan parameter ke dalam arah negatif yaitu,

$$\frac{d(\theta)}{dt} = -\gamma \frac{\delta J}{\delta \theta} = -\gamma e \frac{\delta e}{\delta \theta} \quad (2.24)$$

Turunan parsial  $\frac{\delta e}{\delta \theta}$  yang biasa disebut dengan turunan sensitifitas sistem, menggambarkan bagaimana *error* dipengaruhi oleh perubahan parameter. Bila diasumsikan bahwa perubahan parameter lebih lambat dibandingkan variabel lain pada sistem, maka turunan  $\frac{\delta e}{\delta \theta}$  dapat dievaluasi dengan asumsi bahwa  $\theta$  bernilai tetap.

## 2.8 Root Mean Square Error RMSE

RMSE adalah salah satu dari sekian banyak metode untuk memvalidasi keakuratan suatu variabel kontinyu. Selain RMSE masih banyak metode untuk validasi, seperti MSE (*Mean Square Error*) dan MAE (*Mean Absolut Error*). Langkah pertama dalam metode RMSE adalah mencari nilai *error*. *Error* dinyatakan sebagai perbedaan antara nilai ekspektasi dengan nilai yang nyata didapatkan. Perbedaan nilai tersebut selanjutnya dikuadratkan dengan tujuan menyamaratakan polarisasi *error*. Setelah semua *error* memiliki polarisasi yang sama, dilakukan perhitungan rata-rata dari keseluruhan *error* tersebut. Langkah akhir dari metode RMSE adalah mengakarkan nilai rata-rata *error* yang telah didapatkan sebelumnya.

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (2.25)$$

dimana:

$y_j$  : nilai ekspektasi ke-j

$\hat{y}_j$  : nilai nyata yang didapatkan ke-j



## **BAB 3**

### **PERANCANGAN SISTEM**

Bab ini berisi penjelasan langkah-langkah yang dilakukan dalam merancang sistem *quadruple tank* beserta strategi pengaturan level sistem tersebut. Perancangan dimulai dengan pemodelan *non-linear* sistem *quadruple tank*, dilanjutkan dengan desain *decoupler* dan yang terakhir adalah perancangan kontroler PID dengan menggunakan teknik MRAC.

#### **3.1 Gambaran Umum Sistem**

Sistem pengaturan level *quadruple tank* terdiri dari model matematis *non-linear* proses dinamis yang berjalan pada sistem *quadruple tank*. Selain itu digunakan *decoupler* yang berfungsi untuk menghilangkan interaksi silang antara *control loop* tangki 1 dan tangki 2 sehingga merubah karakteristik sistem yang semula MIMO menjadi SISO, sehingga mempermudah analisis dan penentuan kontroler yang sesuai. *Decoupler* yang telah berhasil dirancang menghasilkan keluaran  $v_1$  dan  $v_2$  yang mana merupakan voltase dari pompa 1 dan pompa 2. Bagian terakhir dalam keseluruhan sistem adalah kontroler PID yang dirancang sedemikian rupa dengan menggunakan teknik MRAC untuk mengkompensasi perubahan parameter saat *plant* berjalan. *Adaptation mechanism* yang terdapat pada kontroler PID berbasis MRAC ditentukan dengan menggunakan metode gradien *MIT Rule*.

#### **3.1 Pemodelan Non-linear Quadruple Tank Plant**

Pemodelan *Quadruple Tank Plant* adalah langkah pertama yang dilakukan dalam serangkaian perancangan sistem pengaturan level. Sistem *quadruple tank* dimodelkan dengan mempertahankan karakteristik *non-linear* karena kontroler yang digunakan adalah kontroler adaptif. Selain itu dengan mempertahankan persamaan *non-linear*, strategi kontrol yang telah didesain akan memiliki akurasi yang tepat disaat diimplementasikan pada sistem riil.

Persamaan kesetimbangan neraca massa dan hukum *bernoulli* menjadi landasan utama dalam memodelkan persamaan dinamis *non-linear* sistem *quadruple tank*. Hubungan antara *input* dan *output* yang terjadi di masing-masing keempat tangki dapat dijelaskan dengan neraca kesetimbangan massa. Total jumlah massa yang terdapat dalam satu tangki adalah total jumlah massa yang masuk dikurangi dengan total

jumlah massa yang keluar. Massa *liquid* adalah massa jenis *liquid* ( $\rho$ ) dikalikan dengan volume ( $v$ ). Bila dalam satu sistem *quadruple tank* menggunakan satu jenis *liquid* maka parameter massa jenis *liquid* ( $\rho$ ) yang berada pada setiap tangki dapat diabaikan. Selanjutnya volume salah satu tangki sendiri dapat diubah menjadi perkalian luas penampang tangki ( $A$ ) dikalikan dengan ketinggian *liquid* dalam tangki ( $h$ ). Dengan adanya variabel ( $h$ ) dalam persamaan dinamis sistem *quadruple tank*, maka dapat dilakukan pemodelan untuk melihat dinamisasi perubahan level *liquid* ( $h$ ) yang terjadi saat sistem dijalankan.

$$\frac{dh_1(t)}{dt} == \frac{1}{A_1} [-a_1\sqrt{2gh_1} + a_3\sqrt{2gh_3} + K_1V_1\gamma_1] \quad (3.1)$$

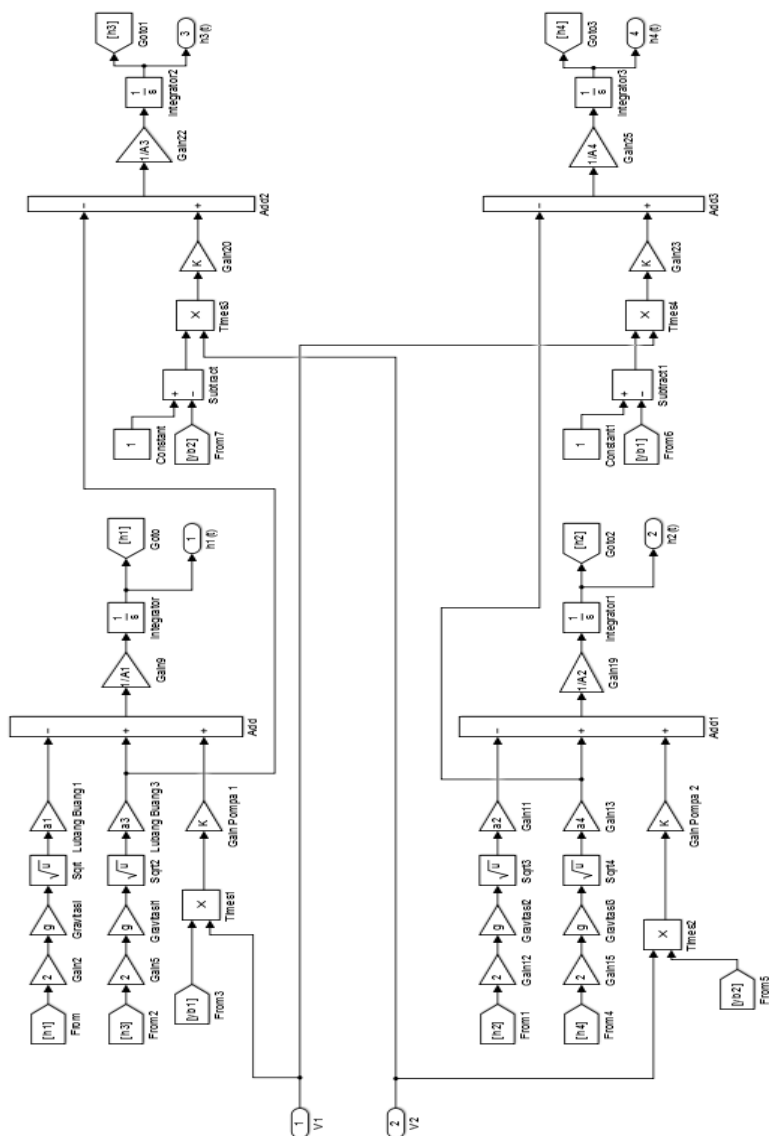
$$\frac{dh_2(t)}{dt} == \frac{1}{A_2} [-a_2\sqrt{2gh_2} + a_4\sqrt{2gh_4} + K_1V_1\gamma_2] \quad (3.2)$$

$$\frac{dh_3(t)}{dt} = \frac{1}{A_3} [-a_3\sqrt{2gh_3} + (1 - \gamma_2)k_2v_2] \quad (3.3)$$

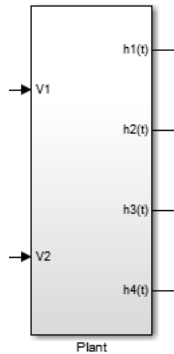
$$\frac{dh_4(t)}{dt} = \frac{1}{A_4} [-a_4\sqrt{2gh_4} + (1 - \gamma_1)k_1v_1] \quad (3.4)$$

Dari persamaan *non-linear* yang telah dirumuskan, persamaan tersebut selanjutnya diubah kedalam bentuk diagram blok pada perangkat lunak matlab dengan bantuan fitur simulink. Jenis-jenis diagram blok simulink yang digunakan dalam pembentukan diagram blok sistem keseluruhan adalah diagram blok *math function*. Setelah perancangan diagram blok model *non-linear* selesai dilakukan, setiap keluaran tanki diberi blok integrator untuk mendapatkan variabel kondisi keluaran (*state*) berupa  $h_1, h_2, h_3$  dan  $h_4$ .

Ada yang perlu diperhatikan bahwa dalam kondisi nyata, sistem *quadruple tank* yang terdapat pada laboratorium pengendalian proses Departemen Teknik Kimia ITS tidak memiliki sensor pembaca ketinggian air di dua tangki atas (3 dan 4). Jadi dengan kata lain hanya dua tangki di bawah (1 dan 2) yang dapat memberikan pembacaan variabel kondisi keluaran untuk dievaluasi oleh *decoupler* dan kontroler. Hilangnya variabel kondisi keluaran berupa  $h_3$  dan  $h_4$  akan dikompensasi dengan penggunaan *state observer*. Namun pada saat penulis merancang *decoupler* yang mana merupakan tahap kedua dalam perancangan, sistem dianggap memiliki keempat sensor.



**Gambar 3.1** Model matematis *non-linear quadruple tank* dalam simulink



**Gambar 3.2** Model matematis *non-linear quadruple tank* yang dirangkum dalam satu *subsystem plant*

Parameter-parameter yang terdapat pada model matematis *plant* diperoleh dari data spesifikasi *quadruple tank* yang ada di Departemen Teknik Kimia. Data parameter dimasukkan kedalam perhitungan model matematis yang telah dibuat di simulink melalui *script* yang akan terhubung dengan *workspace* matlab saat dijalankan. Adapun nilai dari parameter-parameter tersebut adalah

**Tabel 3.1** Parameter spesifikasi *plant*

Parameter	Ukuran
Luas alas tangki (A)	0,03143 m <sup>2</sup>
Luas permukaan lubang bawah (a)	6,723x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup>
Luas permukaan lubang samping (a')	3,665x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup>
Percepatan gravitasi (g)	9,9 m/s <sup>2</sup>
Konstanta pompa (k)	1

### 3.2 Decoupler Non-linear

Dilihat dari Model matematis *plant* yang telah berbentuk diagram blok simulink, setiap keluaran khususnya  $h_1$  dan  $h_2$  memiliki interaksi silang antara keduanya. Interaksi silang yang terjadi dapat dilihat langsung pada model matematis *plant*, yang mana ketinggian air di suatu tangki akan mempengaruhi ketinggian air tangki lainnya yang saling terhubung jalur buangnya. Hal tersebut tentu akan menyulitkan perancangan kontroler level *quadruple tank*, karena bila salah satu di antara tangki 1 atau tangki 2 diberikan masukan tertentu, maka keluaran

tangki lainnya akan terpengaruh. Untuk mempermudah penulis melakukan perancangan kontroler, maka interaksi silang yang terjadi haruslah dihilangkan semaksimal mungkin. *Decoupler* adalah salah satu perangkat pada sistem yang berfungsi menghilangkan interaksi silang tersebut.

Proses perancangan *decoupler* dimulai dengan membentuk model matematis plant untuk tangki 1 dan tangki 2 kedalam bentuk matriks. Model matematis tangki 3 dan tangki 4 tidak diikuti dalam perhitungan karena tujuan penelitian kali ini hanya untuk mengatur level tangki 1 dan tangki 2.

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{f}(\mathbf{h}) + \mathbf{B}\mathbf{V} \quad (3.5)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{h}_1(t) \\ \dot{h}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(h_1) \\ f(h_2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & B_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

dimana:

$$\begin{aligned} f(h_1) &: \frac{-a_1\sqrt{2gh_1}+a_3\sqrt{2gh_3}}{A_1} \\ f(h_2) &: \frac{-a_2\sqrt{2gh_2}+a_4\sqrt{2gh_4}}{A_2} \\ B_{11} &: \frac{K_1\gamma_1}{A_1} \\ B_{22} &: \frac{K_2\gamma_1}{A_2} \end{aligned}$$

Selanjutnya dilakukan linearisasi yang seolah-olah memaksa sistem *quadruple tank* agar memiliki respon berupa fungsi transfer orde satu terhadap masukan tinggi referensi ( $h_r$ ). Besarnya *time constant* ( $\tau_1$  dan  $\tau_2$ ) yang mana mempunyai pengaruh terhadap cepatnya respon disesuaikan dengan desain penulis. Waktu selama 4s dipilih untuk pengujian keandalan *decoupler*. Sedangkan pada saat dilakukan integrasi keseluruhan sistem, *time constant* decoupler diubah menjadi 1s.

$$h_i(S) = \frac{1}{\tau_i S + 1} h_i r \quad \text{untuk } i = 1, 2 \quad (3.7)$$

$$\tau_i \dot{h}_i(S) + h_i(S) = h_i r \quad (3.8)$$

$$\dot{h}_i(t) = -\frac{1}{\tau_i} h_i(t) + \frac{1}{\tau_i} h_i r \quad (3.9)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{h}_1(t) \\ \dot{h}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\tau_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{\tau_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 r \\ h_2 r \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{A}^* \mathbf{h} + \mathbf{B}^* \mathbf{h} \mathbf{r} \quad (3.11)$$

Selanjutnya dilakukan penggabungan persamaan (3.5) dengan persamaan (3.11) untuk mencari persamaan gabungan *plant*. Operasi selanjutnya tidak berhenti sampai tahap penggabungan persamaan, namun dilakukan pula modifikasi agar persamaan hasil penggabungan tetap sama dengan persamaan (3.5). Adapun tahap tahap penggabungan dan modifikasi persamaan tersebut:

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{f}(\mathbf{h}) + \mathbf{B}\mathbf{V} + \mathbf{A}^* \mathbf{h} + \mathbf{B}^* \mathbf{h} \mathbf{r} \quad (3.12)$$

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{f}(\mathbf{h}) + \mathbf{B}\mathbf{V} + \mathbf{A}^* \mathbf{h} + \mathbf{B}^* \mathbf{h} \mathbf{r} - \mathbf{A}^* \mathbf{h} + \mathbf{B}^* \mathbf{h} \mathbf{r} \quad (3.13)$$

Agar karakteristik keluaran sistem sesuai dengan hasil desain *decoupler* yang berupa order satu dengan nilai *time constant* yang telah ditentukan sebelumnya, persamaan (3.13) dipaksakan menjadi persamaan (3.11). Modifikasi ini mengakibatkan sebagian persamaan (3.13) bernilai nol. Melalui tahap ini, nilai dari V pun dapat diperoleh.

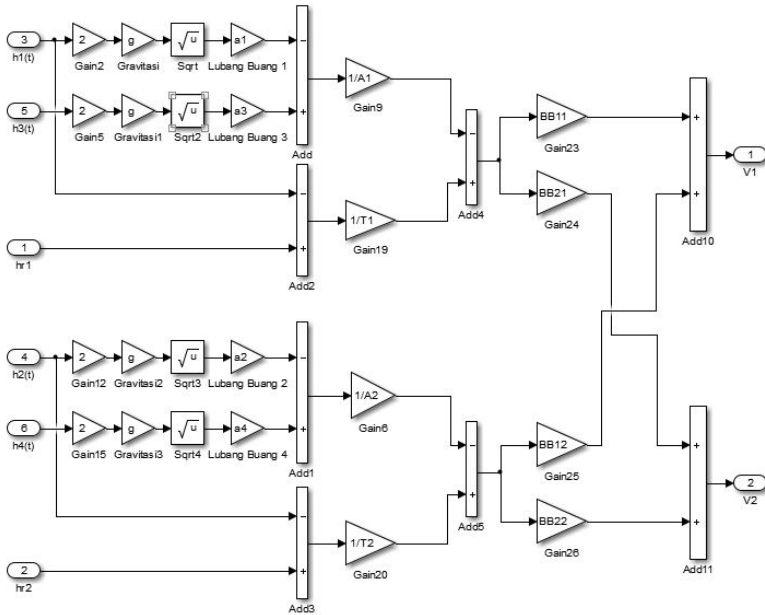
$$\mathbf{f}(\mathbf{h}) + \mathbf{B}\mathbf{V} - \mathbf{A}^* \mathbf{h} - \mathbf{B}^* \mathbf{h} \mathbf{r} = 0 \quad (3.14)$$

$$\mathbf{B}\mathbf{V} = \mathbf{A}^* \mathbf{h} + \mathbf{B}^* \mathbf{h} \mathbf{r} - \mathbf{f}(\mathbf{h}) \quad (3.15)$$

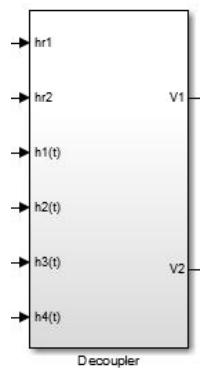
$$\mathbf{V} = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A}^* \mathbf{h} + \mathbf{B}^* \mathbf{h} \mathbf{r} - \mathbf{f}(\mathbf{h})) \quad (3.16)$$

Pada Gambar 3.3, terlihat blok *gain* yang bernilai BB11, BB12, BB21, dan BB22. BB11 adalah elemen matriks (1,1) dari matriks B pada persamaan (3.5), sedangkan nilai BB12, BB21 dan BB22 pun mengikuti aturan yang diterapkan pada BB11. Hal tersebut dilakukan untuk mempermudah pengintegrasian diagram blok *decoupler* pada simulink dengan *script* pada *workspace* perangkat lunak matlab. Dari Gambar 3.3

bisa tergambarkan dengan jelas bahwa  $V_1$  dan  $V_2$  adalah variabel keluaran *decoupler* sekaligus masukan bagi sistem *quadruple tank*.



**Gambar 3.3** *Decoupler sistem quadruple tank*



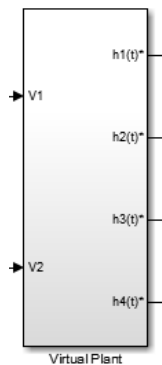
**Gambar 3.4** *Subsystem decoupler*



Pada Gambar 3.4, terlihat *decoupler* mempunyai empat buah masukan selain  $hr1$  dan  $hr2$ , yaitu variabel kondisi keluaran (*state*) yang berasal dari *feedback* keluaran sistem *quadruple tank*.

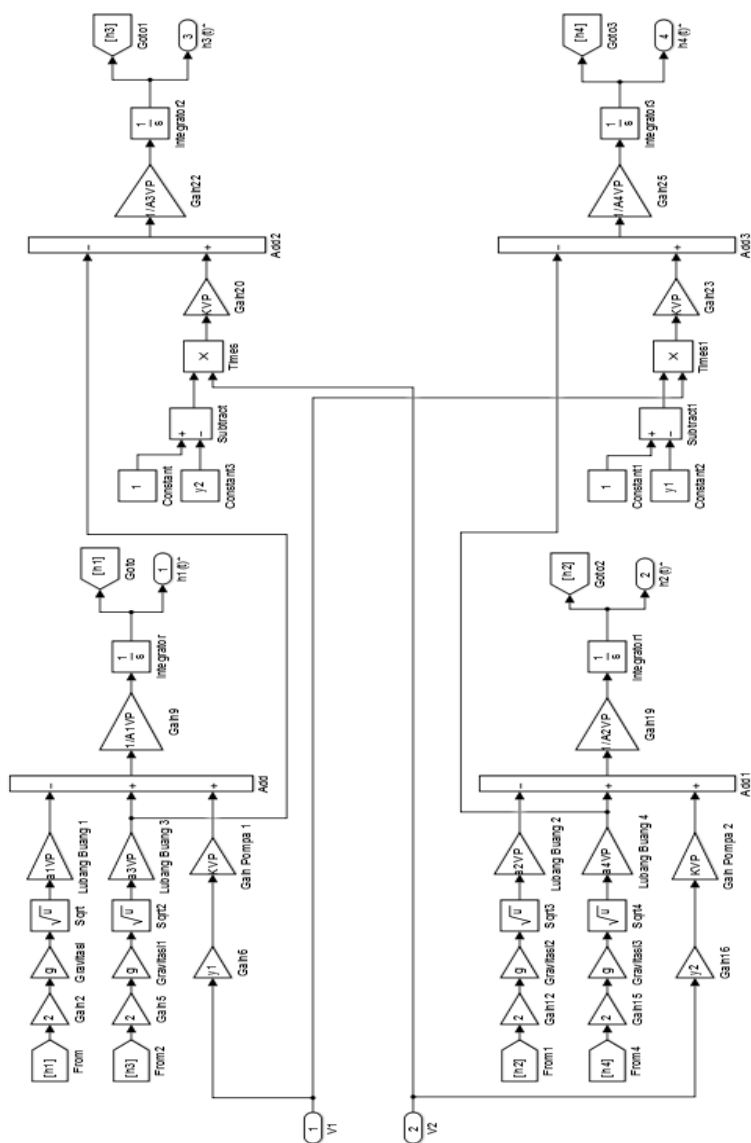
### 3.3 State Observer dengan MIMO State Compensator

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa sistem *quadruple tank* yang berada pada Departemen Teknik Kimia ITS tidak memiliki sensor di dua tangki atas (tangki 3 dan tangki 4). Hal tersebut mengharuskan penulis merancang sebuah komponen sistem yang dapat memperkirakan variabel kondisi keluaran dari tangki 3 dan 4, atau dengan kata lain mengkompensasi ketidaklengkapannya *state* pada sistem. Komponen sistem yang bekerja untuk mengestimasi *state* yang tidak tersedia disebut dengan *state observer*. *Virtual plant* dan *MIMO state compensator* menjadi dua komponen utama penyusun *state observer*. *Virtual plant* berfungsi untuk menghasilkan keluaran yang akan dibandingkan dengan keluaran *plant*. Sedangkan *state compensator* berfungsi untuk meminimalisir selisih antara keluaran *plant* dan keluaran *virtual plant*.



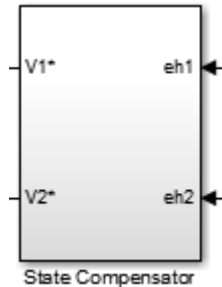
**Gambar 3.5** Subsystem virtual plant

Langkah pertama dalam perancangan *state observer* adalah membuat *subsystem* baru yang bernama *virtual plant*. *Virtual plant subsystem* berisi diagram blok yang dirancang berdasarkan persamaan matematis yang sama dengan persamaan matematis pada *plant*. Notasi yang digunakan sebagai keluaran *virtual plant* adalah  $h_1^*$  dan  $h_2^*$ . Adapun masukan dari *virtual plant* adalah  $V1$  dan  $V2$  yang mana sama dengan masukan *plant*.



**Gambar 3.6** Diagram blok model matematis *virtual plant*

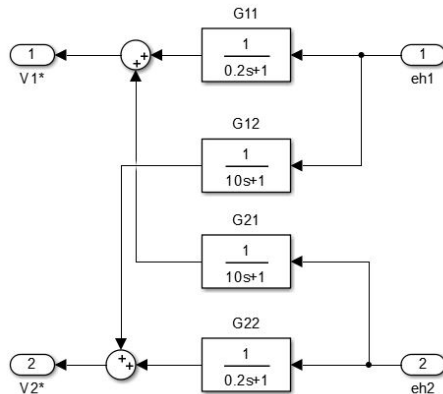
Langkah berikutnya adalah membuat sebuah MIMO *state compensator* yang akan difungsikan untuk meminimalisir *error* semaksimal mungkin. *Error* yang dimaksud dalam kasus perancangan *state observer* adalah selisih antara keluaran  $h_1$  dan  $h_2$  dari *plant* dengan keluaran  $h_1^*$  dan  $h_2^*$  dari *virtual plant*. Berhubung *plant* dan *virtual plant* memiliki kesamaan dalam hal model matematis penyusun dan masukan sistem, maka perlu adanya sebuah rekayasa demi terciptanya selisih antara keluaran dua komponen tersebut. Pemberian *initial condition* yang berupa ketinggian air tangki 1 dan tangki 2 *plant* sesaat sebelum sistem dijalankan, merupakan salah satu cara untuk merekayasa agar munculnya *error*. ketinggian air 0,03cm dan 0,04cm dipilih sebagai *initial condition* Tangki 1 dan Tangki 2. Selanjutnya *error* yang dinotasikan sebagai  $eh_1$  dan  $eh_2$ , harus diusahakan sedemikian rupa agar bernilai sekecil mungkin atau dengan kata lain mendekati nol.



**Gambar 3.7** *Subsystem state compensator*

Dua buah *error* yang masuk kedalam *subsytem state compensator* selanjutnya akan dikalikan masing-masing dengan dua fungsi transfer. Fungsi transfer yang digunakan adalah berupa orde satu dengan nilai *time constant* yang disesuaikan dengan perancangan. Dalam proses pemilihan *gain* untuk *state compensator*, ditemukan konfigurasi yang tepat dengan cara *trial and error*. Konfigurasi yang diterapkan dalam bentuk  $G_{11}$  bernilai sama dengan  $G_{22}$ , sedangkan  $G_{12}$  sama dengan  $G_{21}$ . Konfigurasi ini akan memaksimalkan fungsi kerja *state compensator* dalam mengecilkan *error*. Satu di antara dua fungsi transfer yang terhubung dengan satu *error* akan berhubungan silang dengan satu fungsi transfer *error* lainnya melalui operasi pertambahan. Hubungan silang antara dua fungsi transfer tersebut adalah kunci utama untuk meminimalisir nilai dari *error*. Hal tersebut dikarenakan perbedaan polaritas dari  $eh_1$  and  $eh_2$ .

Dalam perancangan *state compensator* penelitian ini, dipilih nilai 0,2 sebagai *time constant*  $G_{11}$  dan  $G_{22}$  sedangkan 10 untuk  $G_{12}$  dan  $G_{21}$ . Pemilihan tersebut ditujukan untuk mendapatkan nilai *error* sekecil mungkin. Hal tersebut dapat terwujud dengan meneliti mekanisme kerja *state compensator* yang bekerja dengan cara saling menambahkan nilai bersifat osilasi  $eh1$  and  $eh2$  yang masuk. Dengan dibedakannya waktu antara fungsi transfer, maka nilai hasil akhir penambahan silang akan semakin kecil bahkan saling menghilangkan. Hal tersebut diakibatkan perbedaan waktu respon terhadap sinyal osilasi yang masuk. Dalam proses pemilihan terlihat bahwa semakin besar nilai dari *time constant*  $G_{11}$  dan  $G_{22}$ , maka butuh waktu yang lebih lama bagi *error* untuk menuju 0. Sedangkan semakin besar *time constant*  $G_{12}$  dan  $G_{21}$ ,  $E_{ss}$  semakin kecil.

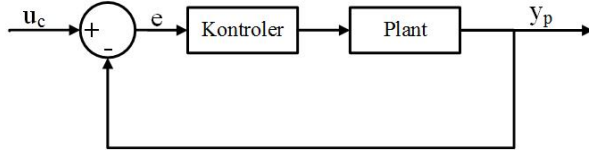


**Gambar 3.8** Hubungan fungsi transfer *state compensator*

### 3.4 Perancangan MRAC PID

Perancangan model MRAC ditujukan untuk menjaga keluaran sistem agar tetap sesuai dengan masukan yang diberikan walau sistem diberikan pembebanan berupa perubahan parameter. kontroler PID menjadi kontroler yang dipilih untuk di *couple* dengan MRAC. Model MRAC bekerja berdasarkan *adaptation mechanism* untuk menentukan parameter kontroler PID saat sistem diberikan beban berupa perubahan parameter. Persamaan kontroler PID dalam bentuk laplace diberikan dalam persamaan (3.17) dan selanjutnya akan disebut dengan persamaan kontroler (K).

$$\frac{U(s)}{C(s)} = K_p \left[ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right] \quad (3.17)$$



**Gambar 3.9** Blok diagram kontroler-plant

Perancangan model MRAC PID dimulai dengan mencari fungsi transfer gabungan kontroler ( $K$ ) dan *plant* ( $P$ ) berdasarkan diagram blok pada Gambar 3.8. Berdasarkan perancangan *decoupler* yang telah dilakukan, maka persamaan *plant* ( $P$ ) diasumsikan berupa fungsi orde satu seperti yang tertera pada persamaan (3.7).

$$y_p = e \cdot K \cdot P \quad (3.18)$$

Dengan mendefinisikan variabel  $e$  sebagai selisih antara keluaran dan masukan ( $u_c - y_p$ ), persamaan (3.18) dapat dimanipulasi menjadi persamaan (3.19) yang selanjutnya menjadi persamaan akhir (3.21)

$$\frac{y_p}{u_c} = \frac{KP}{1 + KP} \quad (3.19)$$

$$\frac{y_p(s)}{u_c(s)} = \frac{\frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s} \frac{b}{s+a}}{1 + \frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s} \frac{b}{s+a}} \quad (3.20)$$

$$\frac{y_p(s)}{u_c(s)} = \frac{bK_d s^2 + bK_p s + bK_i}{(1 + bK_d) s^2 + (a + bK_p) s + bK_i} \quad (3.21)$$

Selanjutnya konfigurasi persamaan model referensi MRAC dapat dibentuk berdasarkan persamaan (3.21) yang berkonfigurasi fungsi transfer orde dua. Persamaan (3.22) didapatkan sebagai bentuk umum fungsi transfer model referensi MRAC yang mana akan menjadi fungsi transfer acuan bagi sistem saat diberikan pembebanan.

$$\frac{y_m(S)}{u_c(S)} = \frac{b_{m2}S^2 + b_{m1}S + b_{m0}}{a_{m0}S^2 + a_{m1}S + a_{m2}} \quad (3.22)$$

Setelah mendapatkan konfigurasi persamaan model MRAC, dilakukan penentuan mekanisme adaptasi parameter kontroler menggunakan teknik MIT *Rule* seperti yang terdapat pada bab 2. Sesuai dengan jenis kontroler yang digunakan, yaitu kontroler PID, maka terdapat tiga parameter kontroler yaitu  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ .

$$\frac{dK_p}{dt} = -\beta_p \frac{\partial J}{\partial K_p} = -\beta_p \left( \frac{\partial J}{\partial \epsilon} \right) \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial K_p} \right) \quad (3.23)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\beta_i \frac{\partial J}{\partial K_i} = -\beta_i \left( \frac{\partial J}{\partial \epsilon} \right) \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial K_i} \right) \quad (3.24)$$

$$\frac{dK_d}{dt} = -\beta_d \frac{\partial J}{\partial K_d} = -\beta_d \left( \frac{\partial J}{\partial \epsilon} \right) \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial K_d} \right) \quad (3.25)$$

Diasumsikan bahwa nilai  $\epsilon = y_p - y_m \rightarrow \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 1$  dan  $\frac{\partial J}{\partial \epsilon} = \epsilon$  maka persamaan (3.23), (3.24), dan (3.25) dapat diubah menjadi persamaan (3.26), (3.27), dan (3.28).

$$\frac{dK_p}{dt} = -\beta_p \frac{\partial J}{\partial K_p} = -\beta_p \epsilon \left( \frac{\partial y}{\partial K_p} \right) \quad (3.26)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\beta_i \frac{\partial J}{\partial K_i} = -\beta_i \epsilon \left( \frac{\partial y}{\partial K_i} \right) \quad (3.27)$$

$$\frac{dK_d}{dt} = -\beta_d \frac{\partial J}{\partial K_d} = -\beta_d \epsilon \left( \frac{\partial y}{\partial K_d} \right) \quad (3.28)$$

Dari persamaan (3.26),(3.27), dan (3.28) terlihat bahwa masih ada persamaan yang belum tersederhanakan sempurna. Untuk memodifikasi tiga persamaan tersebut menjadi persamaan yang sesederhana mungkin, dilakukan penurunan parsial  $y$  dari persamaan (3.21) terhadap masing masing parameter kontroler.

$$\frac{\partial y}{\partial K_p} = \frac{bS}{(1 + bK_d)S^2 + (a + bK_p)S + bK_i} (u_c - y_p) \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial y}{\partial K_i} = \frac{b}{(1 + bK_d)S^2 + (a + bK_p)S + bK_i} (u_c - y_p) \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial y}{\partial K_d} = \frac{bS^2}{(1 + bK_d)S^2 + (a + bK_p)S + bK_i} (u_c - y_p) \quad (3.31)$$

persamaan akhir *adaptation mechanism* didapatkan dengan melakukan substitusi masing-masing persamaan (3.29),(3.30), dan (3.31 persamaan (3.26),(3.27), dan (3.28).

$$\frac{dK_p}{dt} = -\beta_p \epsilon \frac{bS}{(1 + bK_d)S^2 + (a + bK_p)S + bK_i} (u_c - y_p) \quad (3.32)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\beta_i \epsilon \frac{b}{(1 + bK_d)S^2 + (a + bK_p)S + bK_i} (u_c - y_p) \quad (3.33)$$

$$\frac{dK_d}{dt} = -\beta_d \epsilon \frac{bS^2}{(1 + bK_d)S^2 + (a + bK_p)S + bK_i} (u_c - y_p) \quad (3.34)$$

Pemilihan model referensi untuk sistem MRAC disesuaikan dengan persamaan (3.22) yang mana berupa fungsi transfer orde dua. Penentuan fungsi transfer orde dua model referensi sistem MRAC kedua tangki dilakukan dengan mempertimbangkan *pole-pole* dari fungsi transfer tersebut. *Pole-pole* fungsi transfer terdiri dari *pole*  $a$  dan *pole*  $b$  membentuk konfigurasi  $(s + a)(s + b)$ . *Pole*  $a$  adalah *pole* dominan dan diberikan syarat  $b > 3a$ .

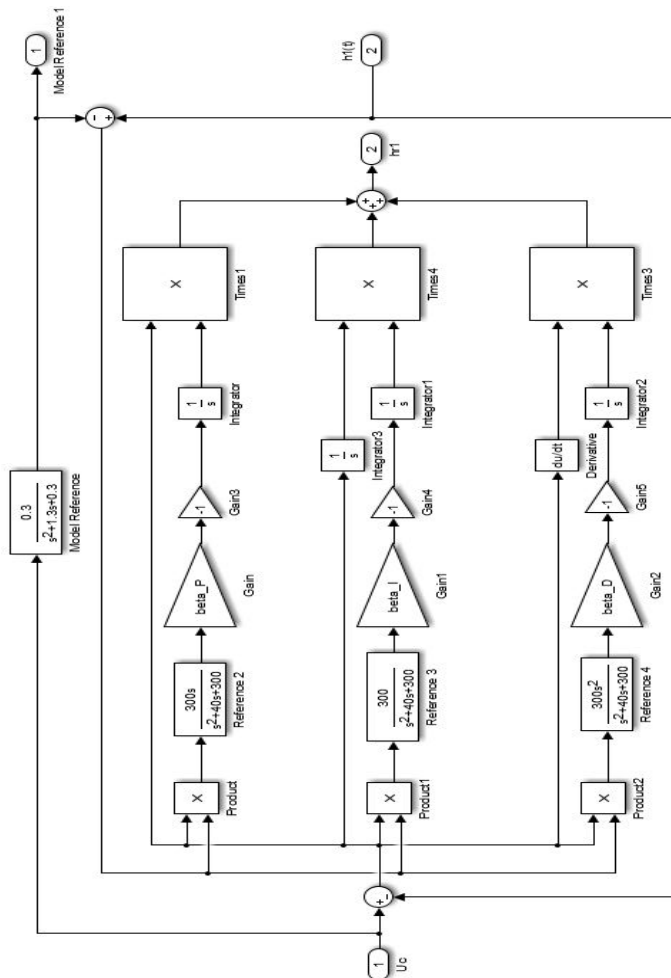


Adapun model referensi sistem MRAC untuk kedua tangki diberikan dalam fungsi transfer yang sama dan nilai 0,3 dipilih sebagai *pole* a dan 1 sebagai *pole* b sesuai persamaan (3.35).

$$\frac{y_m(S)}{u_c(S)} = \frac{0,3}{S^2 + 1,3S + 0,3} \quad (3.35)$$

Fungsi transfer yang terdapat pada persamaan *adaptation mechanism* parameter kontroler memegang peranan utama dalam menentukan cepat lambatnya proses adaptasi parameter kontroler berjalan. Untuk menjamin agar waktu respon *adaptation mechanism* parameter kontroler lebih cepat daripada waktu respon model referensi, perlu adanya syarat *pole adaptation mechanism* > 3 *pole* model referensi.

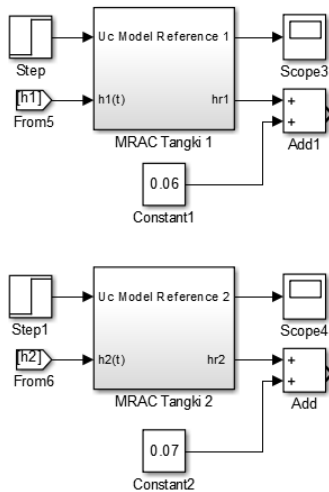
$$\frac{300}{S^2 + 40S + 300} \quad (3.36)$$



**Gambar 3.10** MRAC PID untuk tangki 1 dan tangki 2

Pada perancangan MRAC PID tahap akhir, ada satu hal yang paling penting untuk diperhatikan agar sistem dapat dijalankan. Pada saat MRAC PID diintegrasikan dengan seluruh sistem, harus dipastikan bahwa sinyal kontrol keluaran dari MRAC tidak boleh sama atau bahkan kurang dari ketinggian awal tangki 1 dan tangki 2 sistem *quadruple tank*.

Dalam kata lain bila kita memberikan sejumlah *initial condition* pada tangki 1 dan tangki 2, maka keluaran dari MRAC PID harus dibedakan lebih tinggi dari *initial condition plant*. Nominal pasti dari nilai yang ditambahkan dengan sinyal kontrol MRAC diatur sedemikian rupa sampai respon *plant* mampu mengikuti respon model referensi sebaik mungkin. Selisih sebesar 0,3 diberikan pada keluaran MRAC PID tangki 1 dan 0,4 untuk tangki 2. Dengan catatan pemberian *initial condition* sesuai dengan bahasan perancangan *state observer* sebelumnya.



**Gambar 3.11** Subsystem MRAC PID tangki 1 dan tangki 2

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## **BAB 4**

### **PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM**

#### **4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem**

Pada bab ini akan dilakukan pengujian kinerja dan performansi sistem yang telah dirancang sedemikian rupa. Selain itu, dilakukan pula analisis data hasil yang diperoleh dari pengujian tersebut. Pengujian dilakukan pada masing-masing komponen penyusun sistem pengaturan level *quadruple tank* dengan kontroler MRAC-PID. Adapun komponen-komponen yang diuji adalah *quadruple tank plant*, *decoupler*, *state observer*, dan kontroler MRAC-PID.

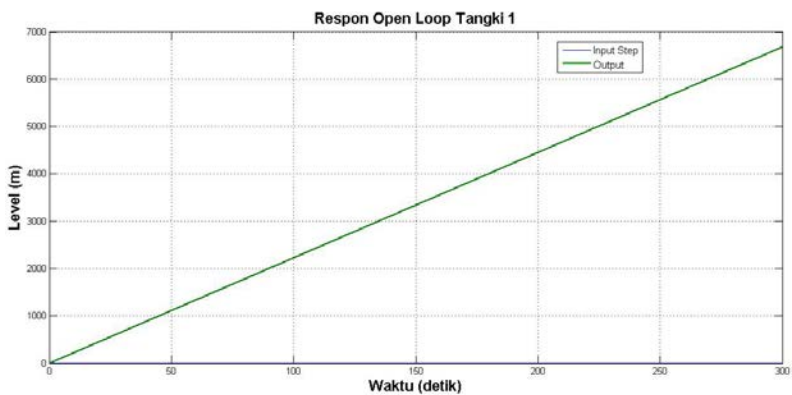
Pengujian yang dilakukan pada *quadruple tank plant* adalah pengujian berupa *open loop test*. Selanjutnya pada komponen *decoupler* akan dilakukan pengujian kesesuaian performansi dengan hasil desain sebelumnya. Pengujian tersebut dilakukan dengan dan tanpa gangguan untuk membuktikan hilangnya interaksi silang pada kedua keluaran *plant*. Komponen *observer* akan diuji kemampuannya dalam mengestimasi dua keluaran  $h_3$  dan  $h_4$  pada dua kondisi, yaitu dengan dan tanpa pembebanan. Komponen terakhir yang akan mengalami serangkaian pengujian adalah kontroler MRAC-PID. Kontroler akan diuji kemampuannya dalam merekayasa keluaran sistem agar sesuai dengan masukan yang diberikan. Ada beberapa jenis masukan sistem dan kondisi saat dilakukannya pengujian kontroler. Jenis masukan yang diberikan meliputi *step input* dan sinyal naik turun untuk uji *level tracking*. Pengujian kontroler tersebut dilakukan dalam dua kondisi pula, yaitu dengan dan tanpa beban.

Setelah sistem pengaturan yang telah dirancang mengalami beberapa pengujian, maka dilakukan analisis data hasil pengujian untuk meninjau apakah sistem sesuai dengan kriteria spesifikasi yang ditentukan atau tidak. Analisis dilakukan dalam ruang lingkup parameter-parameter kriteria sistem beserta perhitungan RMSE (*root mean square error*).

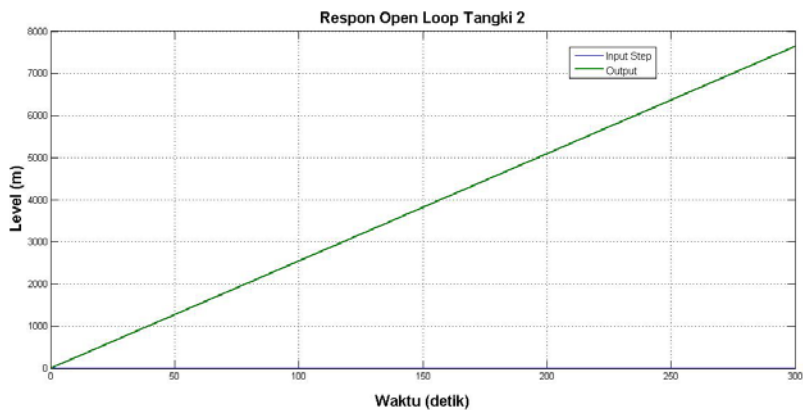
#### **4.2. Pengujian Open Loop Quadruple Tank Plant**

Model matematis *non-linear quadruple tank* yang sebelumnya telah dibentuk menjadi diagram blok pada simulink, harus diuji dengan pengujian *open loop* demi memastikan suksesnya proses pembuatan diagram blok tersebut. Suksesnya pembuatan diagram blok persamaan

matematis *non-linear* sistem ditandai dengan adanya hubungan antara masukan dan keluaran. Selain itu, pengujian ini dimaksudkan untuk melihat karakteristik keluaran sistem terhadap masukan yang diberikan. Sebelum menjalankan uji coba *open loop*, pastikan nilai-nilai parameter sistem yang tercantum pada script *matlab* dijalankan terlebih dahulu agar nilai parameter tersebut masuk ke dalam *workspace* dan selanjutnya terhubung dengan blok simulink.



**Gambar 4.1** Respon keluaran tangki 1 terhadap masukan *step*



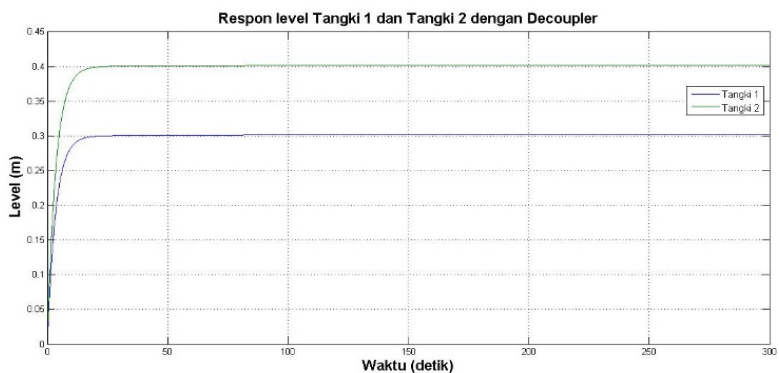
**Gambar 4.2** Respon keluaran tangki 2 terhadap masukan *step*

Masukan berupa step diberikan pada masing masing masukan sistem *quadruple tank*. Setelah dilakukan pemberian masukan berupa step, didapatkan hasil keluaran respon masing-masing tangki 1 dan tangki 2 pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Dari hasil yang diperoleh, dapat dibuktikan bahwa perancangan model matematis *non-linear quadruple tank* dalam bentuk diagram blok simulink telah berhasil dilakukan. Hal tersebut terbukti dari terjalannya hubungan masukan dan keluaran sistem. Selain itu, dengan tidak adanya kontroler menyebabkan keluaran sistem tidak dapat menuju nilai masukan yang diberikan. Karakteristik persamaan matematis *non-linear* berupa integrator dapat terlihat dari keluaran yang terus menerus bertambahnya seiring berjalannya waktu. Selain itu interaksi silang antar Tangki 1 dan Tangki 2 juga masih terjadi, sehingga dibutuhkan *decoupler* untuk menghilangkannya.

## 4.2 Pengujian Performansi *Decoupler*

### 4.2.1 Pengujian Tanpa beban

Pada pengujian ini akan dilakukan penggabungan *subsystem plant* Gambar 3.2 dengan *subsystem decoupler* Gambar 3.4. Masukan pengujian diberikan melalui *port* hr1 dan hr2. Pengujian dibedakan kedalam empat jenis pengujian yang mana memiliki tujuannya masing masing. Pengujian pertama dilakukan dengan memberikan masukan berupa *unit step* dengan nilai yang berbeda untuk masing-masing tangki 1 dan tangki 2.



**Gambar 4.3** Respon keluaran tangki 1 dan tangki 2 dengan *decoupler*

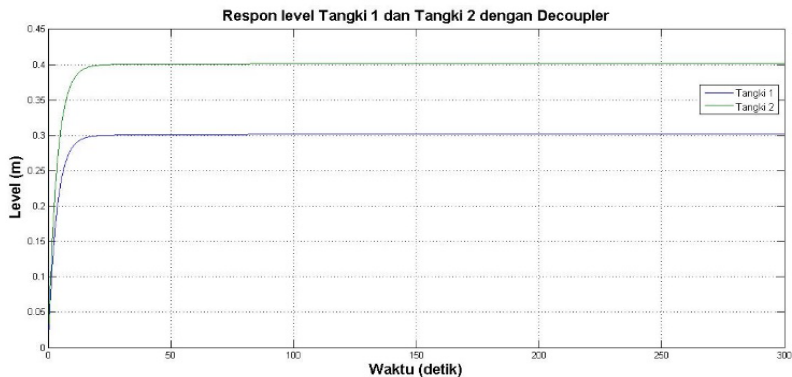
**Tabel 4.1** Karakteristik *transient level* dengan *decoupler*

Karakteristik	Tangki 1	Tangki 2
<i>Time Constant</i> ( $\tau$ ) (detik)	4,0232	4,0232
<i>Settling Time</i> 2% (detik)	16,0929	16,0929
<i>Rise Time</i> 5%-95% (detik)	11,8462	11,8462
RMSE	0,0000	0,0000

Dari Tabel 4.1, terlihat bahwa kedua tangki memiliki karakteristik *transient level* lebih lambat 0.232s dari perancangan dalam hal *time constant*, dimana nilai *time constant* yang diberikan adalah 4s. Perbedaan waktu antara desain dengan hasil pengujian terpaut  $\pm 0.2s$ . Perbedaan ini dapat ditolerir mengingat selisih yang ada disebabkan ketidaktepatan nilai yang ditinjau tidak tepat pada saat 0,632 nilai *set point*. Hal tersebut diakibatkan ketidaktepatan waktu *sampling*. Selain itu sistem Dapat meraih nilai dari *set point* dengan RMSE 0.

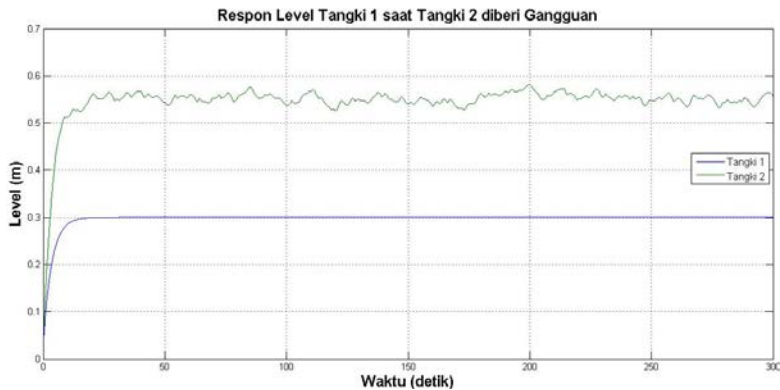
#### 4.2.2 Pengujian dengan Gangguan

Pengujian selanjutnya tidak jauh berbeda dengan pengujian pertama, tetapi blok fungsi *uniform random number* ditambahkan pada salah satu masukan. Blok fungsi *uniform random number* diatur dengan simpangan minimum 0.1 dan maksimum 0.2 pada *sample time* 1s. Selanjutnya sebelum keluaran blok fungsi *uniform random number* ditambahkan dengan masukan *unit step*, diberikan sebuah fungsi transfer orde 1 satu dengan *time constant* sebesar 0,5s.



**Gambar 4.4** Respon keluaran tangki 1 dan tangki 2 sebelum diberi gangguan





**Gambar 4.5** Respon Level tangki 1 saat tangki 2 diberi gangguan

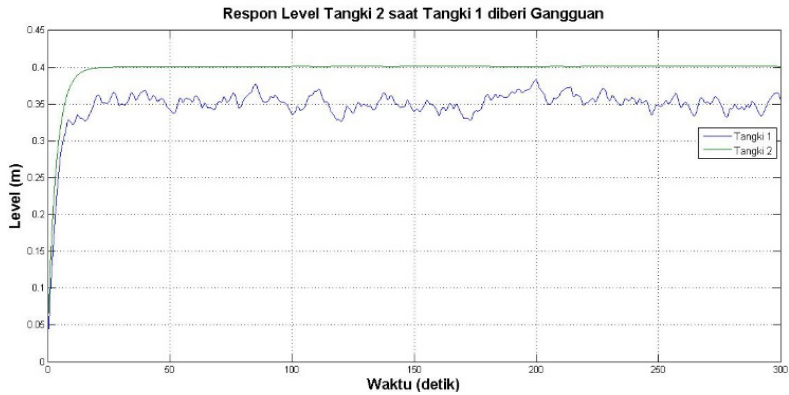
**Tabel 4.2** Karakteristik *transient* level tangki 1 saat tangki 2 terganggu

Karakteristik	Tangki 1
<i>Time Constant</i> ( $\tau$ ) (detik)	4,0000
<i>Settling Time</i> 2% (detik)	16,0000
<i>Rise Time</i> 5%-95% (detik)	11,7778
RMSE	0,0000

Dari Gambar 4.4 dan 4.5 terlihat dengan jelas bahwa *decoupler* berhasil mengeliminasi interaksi silang antara tangki 1 dan tangki 2 dengan sangat baik. Selain itu bila dilihat karakteristik *transient* level kedua tangki, terlihat bahwa dengan diberikannya gangguan pada salah satu tangki tidak akan mempengaruhi karakteristik tangki lainnya. Tujuan utama perancangan *decoupler* selain linearisasi dapat dikatakan tercapai dengan baik dengan hilangnya interaksi silang antara tangki 1 dan tangki 2, maka.

**Tabel 4.3** Karakteristik *transient* level tangki 2 saat tangki 1 terganggu

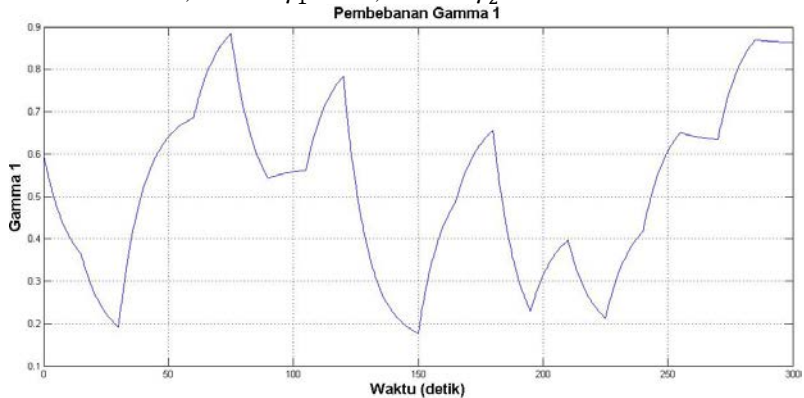
Karakteristik	Tangki 1
<i>Time Constant</i> ( $\tau$ ) (detik)	4,0000
<i>Settling Time</i> 2% (detik)	16,0000
<i>Rise Time</i> 5%-95% (detik)	11,7778
RMSE	0,0000



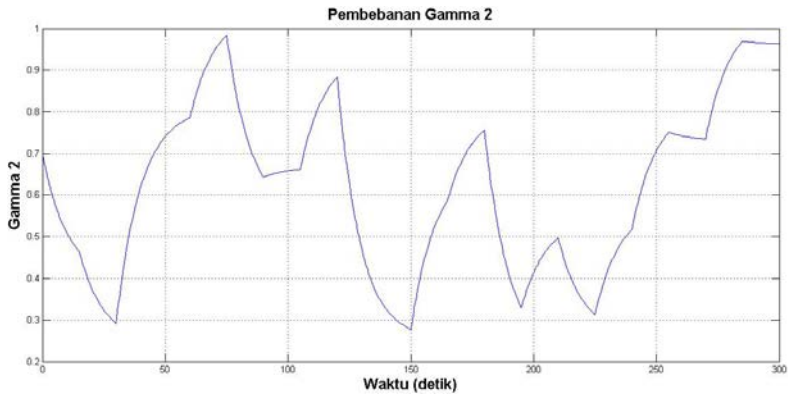
**Gambar 4.6** Respon Level tangki 2 saat tangki 1 diberi gangguan

#### 4.2.3 Pengujian Berbeban Perubahan Fasa

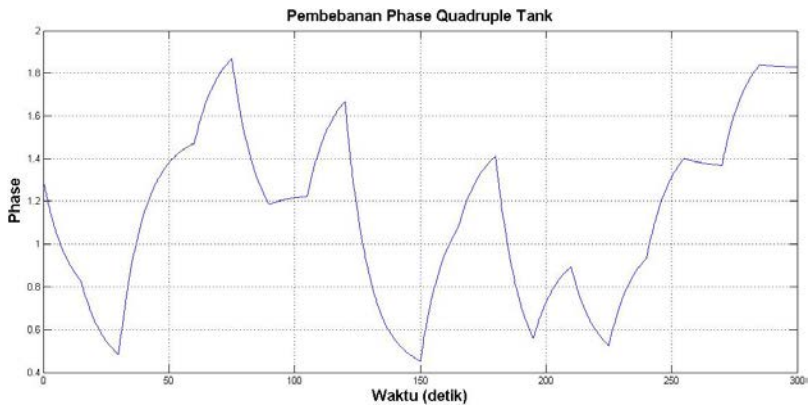
Setelah melakukan pengujian *decoupler* dengan dan tanpa gangguan, maka pengujian yang terakhir adalah pengujian yang dilakukan dengan pembebanan perubahan fasa. Adapun yang dimaksud dengan pembebanan adalah perubahan nilai  $\gamma_1$  dan  $\gamma_2$ . Pembebanan ini menyebabkan *quadruple tank* memasuki mode *non minimum phase* dan *minimum phase* seperti yang telah dijelaskan di bab 2. Pengujian ini ditujukan untuk melihat sejauh mana *decoupler* dapat mempertahankan *setpoint* saat nilai gamma diubah-ubah. Pada saat sebelum sistem dimulai, diberikan nilai 0,6 untuk  $\gamma_1$  dan 0,7 untuk  $\gamma_2$ .



**Gambar 4.7** Perubahan gamma 1

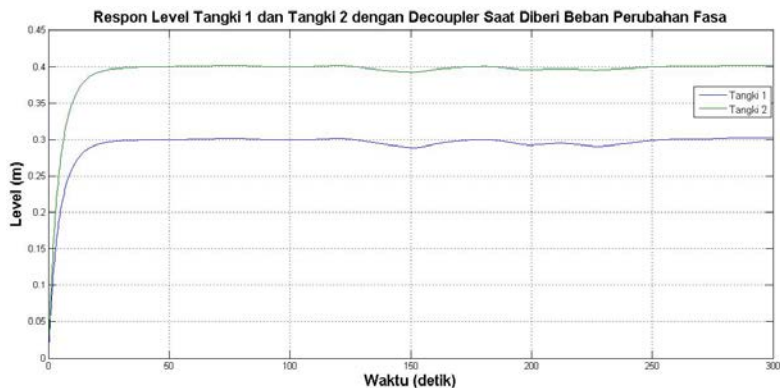


**Gambar 4.8** Perubahan gamma 2



**Gambar 4.9** Phase dari quadruple tank.

Pembebanan dilakukan dengan menggunakan blok *uniform random number* yang bekerja untuk menghasilkan sinyal acak. Blok *uniform random number* diatur dengan simpangan minimal -0.5 dan maksimal 0.4 dengan *sample time* 15s. Sebelum keluaran acak ditambahkan dengan nilai awal gamma, blok *uniform random number* dihubungkan dengan fungsi transfer orde satu dengan *time constant* 10s. Selanjutnya sama seperti dua pengujian *decoupler* sebelumnya, tangki 1 diberi masukan *step input* dengan nilai 0.3 sedangkan 0.4 untuk tangki 2.



**Gambar 4.10** Respon level tangki 1 dan 2 saat berbeban perubahan fasa

**Tabel 4.4** Karakteristik *transient* level tangki 1 dan tangki 2 dengan beban

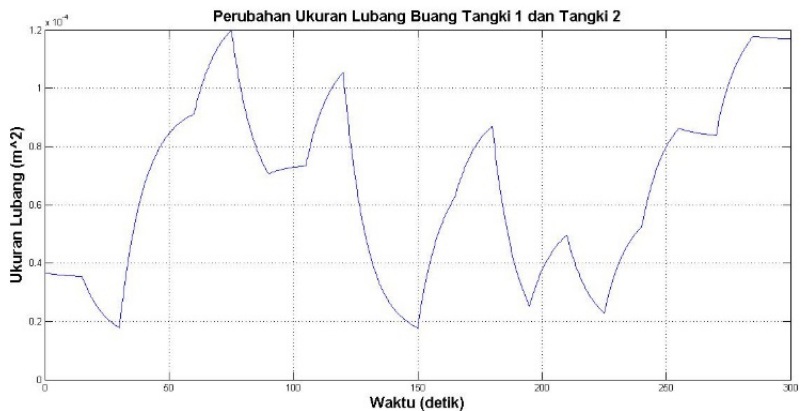
Karakteristik	Tangki 1	Tangki 2
<i>Time Constant</i> ( $\tau$ ) (detik)	4,4152	4,4152
<i>Settling Time</i> 2% (detik)	17,6607	17,6607
<i>Rise Time</i> 5%-95% (detik)	13,0002	13,0002
RMSE	0,0050	0,0040

Setelah dilakukan pengujian dengan pembebanan perubahan fasa, diperoleh hasil karakteristik *transient* level tangki 1 dan tangki 2 seperti yang tertera pada Tabel 4.4. Pembebanan yang diberikan menyebabkan respon sistem sedikit terlambat terhadap masukan yang diberikan. Hal ini bisa dilihat dari bertambahnya *time constant* sebesar 0,4152 dari desain yang telah dirancang. Respon level dapat meraih *set point* untuk pertama kalinya pada detik 48,5974 untuk tangki 1 dan 48,9434 untuk tangki 2. Selain itu pembebanan berupa perubahan fasa akan terlihat jelas pengaruhnya saat sistem sudah meraih *set point*. Fasa *non-minimum* yang terjadi sebelum sistem meraih *set point* menyebabkan sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk meraih *set point*. Sedangkan fasa *non-minimum* yang terjadi setelah sistem meraih *set point* menyebabkan sistem tidak dapat mempertahankan respon pada nilai *set point* sehingga menyebabkan timbulnya osilasi. RMSE tangki 1 sebesar 0,4cm sedangkan tangki 2 sebesar 0,5cm.

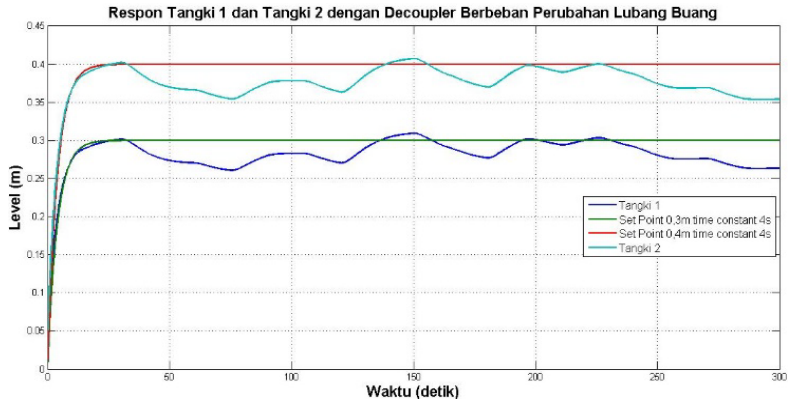
#### 4.2.4 Pengujian Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang

Percobaan terakhir yang dilakukan adalah pengujian peformansi decoupler terhadap perubahan ukuran lubang buang tangki 1 dan tangki 2. Perubahan ukuran lubang diwujudkan dengan cara penggunaan blok *uniform random number* dengan nilai minimum -0.00003 dan nilai maksimum 0.0002. Sebelum blok *uniform random number* ditambahkan dengan nilai nominal  $a_1$  dan  $a_2$ , diberikan sebuah fungsi transfer dengan *time constant* 10s. Fungsi transfer digunakan untuk memperhalus perubahan ukuran lubang, sehingga tidak berbentuk sinyal kotak. Grafik perubahan ukuran lubang dapat dilihat di Gambar 4.11

Dari hasil yang didapat, *decoupler* terbukti tidak dapat menjaga sistem untuk stabil di nilai *set point* yang diberikan. Sistem mengalami simpangan terjauh pada detik ke 75 dan detik ke 300. Hal tersebut diakibatkan sistem sedang mengalami puncak minimum gangguan ukuran lubang. Simpangan terbesar tangki 1 sebesar -3,95 cm dan simpangan tangki 2 sebesar -3,53 cm. Tangki 1 memiliki RMSE sebesar 3,6cm sedangkan tangki 2 sebesar 2,9cm. Dari hasil pengujian ini dapat disimpulkan bahwa pada saat lubang buang tangki 1 dan tangki 2 mencapai ukuran bukan nominalnya, *decoupler* tidak lagi dapat menjaga kestabilan sistem. Level Air yang terdapat pada tangki 1 dan tangki 2 pun seketika turun pada saat fenomena itu terjadi.



**Gambar 4.11** Perubahan ukuran lubang tangki 1 dan tangki 2



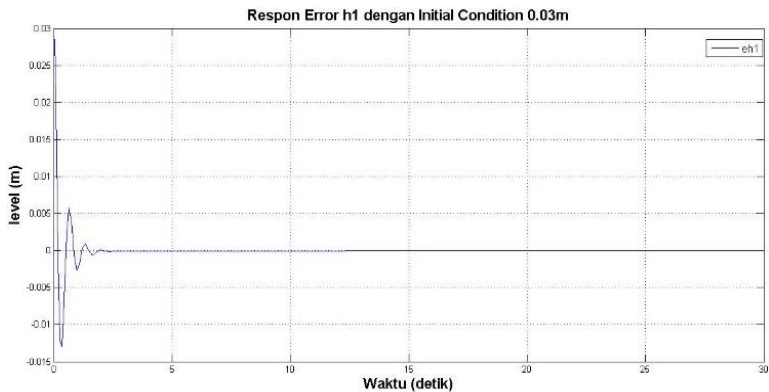
**Gambar 4.12** Respon level tangki 1 dan tangki 2 dengan beban perubahan lubang

### 4.3 Pengujian *State Observer*

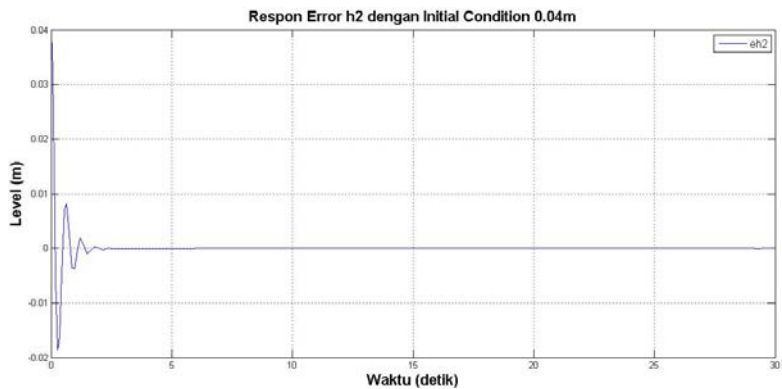
Sesuai dengan fungsi *state observer* sebagai pengestimasi *state* yang tidak tersedia, maka pengujian dilakukan dengan tujuan untuk melihat seberapa akuratkah *state observer*. Keakuratan proses estimasi *state*  $h_3$  dan  $h_4$  dapat dilihat dari kemampuan *state compensator* meminimalisir *error* antara  $h_1$  dan  $h_2$ . Selain itu layaknya pengujian sebelumnya, pengujian *state observer* dilakukan dengan dan tanpa pembebanan. Perlu digarisbawahi bahwa *initial condition* harus diberikan pada tangki 1 dan tangki 2 sesaat sebelum pengujian dimulai.

#### 4.3.1 Pengujian Tanpa Beban

Pengujian pertama kali dilakukan tanpa pemberian beban. Setelah pengujian selesai dilakukan dengan *initial condition* sesuai dengan yang tertera di bab 2, didapatkan hasil bahwa *state compensator* mampu memasuki *steady state* pada detik 3,198 pada tangki 1 dan 3,003 pada tangki 2. Pada saat respon *error* sudah dianggap memasuki tahap *steady state*,  $eh1$  menunjukkan  $E_{ss}$  sebesar  $1,001 \times 10^{-4}m$  sedangkan  $5,878 \times 10^{-5}m$  untuk  $eh2$ . Nilai tersebut terbilang sangat kecil sehingga masuk batas yang dapat ditolerir. Kecilnya  $E_{ss}$  dapat diatur sesuai desain dengan cara mengubah-ubah *time constant*  $G_{12}$  dan  $G_{21}$ . Selain itu bila waktu pengamatan diperpanjang, maka terlihat bahwa *state compensator* akan terus menerus mengecilkan nilai dari  $E_{ss}$  masing masing  $eh1$  dan  $eh2$ .



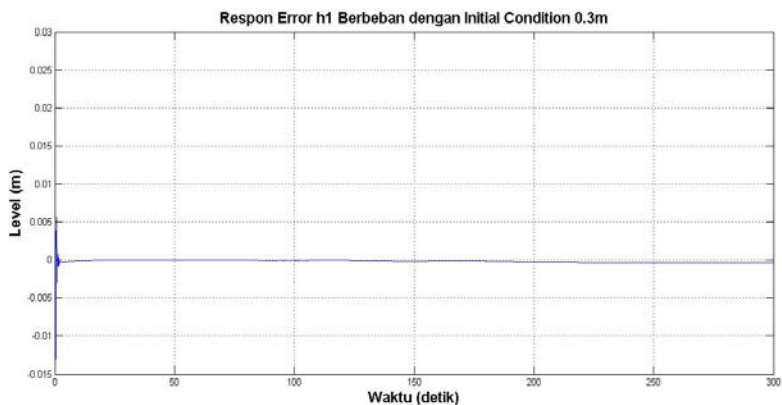
**Gambar 4.13** Respon error  $eh_1$  dengan *state compensator*



**Gambar 4.14** Respon error  $eh_2$  dengan *state compensator*

### 4.3.2 Pengujian Berbeban Perubahan Fasa

Setelah pengujian tanpa beban berhasil dilaksanakan dan menghasilkan performansi yang memuaskan, pengujian dilanjutkan dengan pemberian beban berupa perubahan fasa. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk melihat apakah *state observer* masih mampu bekerja dengan baik walau fasa *quadruple tank* diubah-ubah sehingga masuk ke mode *non-minimum phase* dan *minimum phase*.

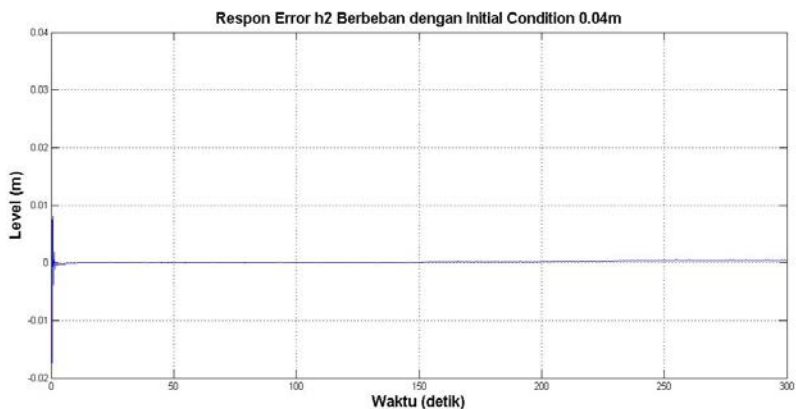


**Gambar 4.15** Respon *error eh1* berbeban perubahan fasa

Dari Gambar 4.12 dapat dianalisis bahwa *state compensator* tetap dapat mempertahankan kemampuannya sampai sebelum detik ke 136. Hal ini terjadi karena pada detik ke 136, fasa *quadruple tank* mulai menuju fasa minimum. Setelah sessat *quadruple tank* mulai memasuki fasa minimumnya di detik ke 136, *state compensator* tidak lagi dapat mempertahankan performansinya. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan semakin bertambahnya nilai  $E_{ss}$  yang mana mencapai puncaknya sebesar  $3,9711 \times 10^{-4}$  m pada detik ke 300. Sedangkan penurunan fasa pada saat sebelum detik ke 136 tidak terlalu berpengaruh bagi *state compensator* untuk mempertahankan nilai *error* semimum mungkin

Berbeda dari analisis *state observer* di tangki 1, *eh2* menunjukkan karakteristik yang berbeda pada saat dilakukan pengujian berbeban. Dari Gambar 4.13 dapat dianalisis bahwa *state compensator* dapat melakukan mampu mempertahankan performansinya sampai detik ke 158. Setelah detik ke 158, nilai *eh2* terus menerus naik sehingga mencapai puncaknya pada akhir waktu pengujian dengan nilai  $4,06 \times 10^{-4}$  m. Keterbatasan *state observer* ini dapat terbilang wajar karena berubahnya nilai fasa mengakibatkan *plant* menjadi tidak stabil, sedangkan hal tersebut tidak terjadi pada *virtual plant*. Perbedaan inilah yang mungkin menyebabkan ketidakmampuan *state observer* menjaga performansinya saat terjadi perubahan fasa. Kesimpulannya, performansi yang ditunjukkan *state observer* masih dapat ditolerir.

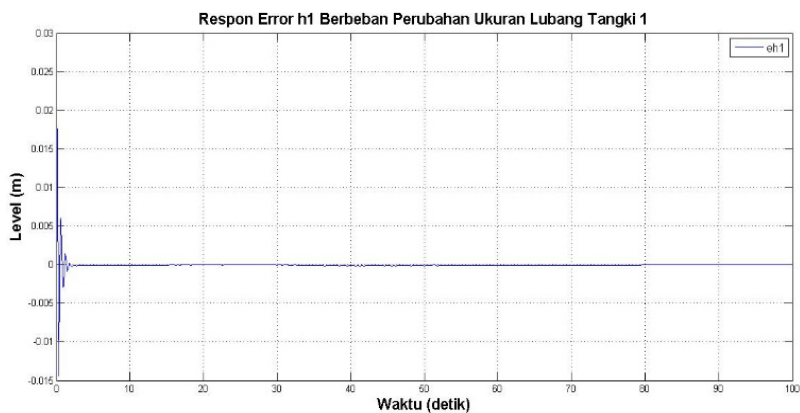




**Gambar 4.16** Respon *error eh2* berbeban perubahan fasa

#### 4.3.4 Pengujian Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang

Pengujian *state observer* yang terakhir adalah pengujian berbeban perubahan ukuran lubang buang tangki 1 dan tangki 2. Setelah dilakukan uji coba, didapatkan hasil bahwa *state observer* dapat bekerja dengan baik dalam kondisi berbeban perubahan ukuran lubang buang. Pernyataan ini berdasarkan nilai *steady state eh1* dan *eh2* yang bersosilasi di sekitar 0,00001 m. Dengan nilai yang sangat kecil seperti itu, maka *state observer* dapat dikatakan tetap bekerja dengan baik.



**Gambar 4. 17** Respon *error eh1* berbeban perubahan ukuran lubang



**Gambar 4.18** Respon *error eh2* berbeban perubahan ukuran lubang

#### 4.4 Pengujian MRAC PID

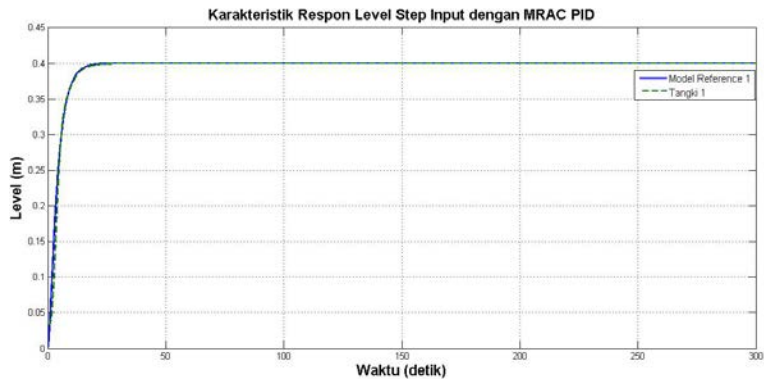
Pengujian MRAC PID dilaksanakan dengan dua sinyal uji, yaitu sinyal *step input* dan sinyal *step* naik. Masing-masing dua sinyal uji diberikan dalam kondisi berbeban dan tanpa beban. Pada bab 4 juga dilaksanakan analisis yang akan mempengaruhi keputusan hasil desain yang telah diterapkan pada bab 3. Pengujian dan analisis pada bab ini dimaksudkan untuk menghasilkan kesimpulan-kesimpulan yang akan berguna bagi penelitian selanjutnya.

##### 4.4.1 Pengujian Tanpa Beban

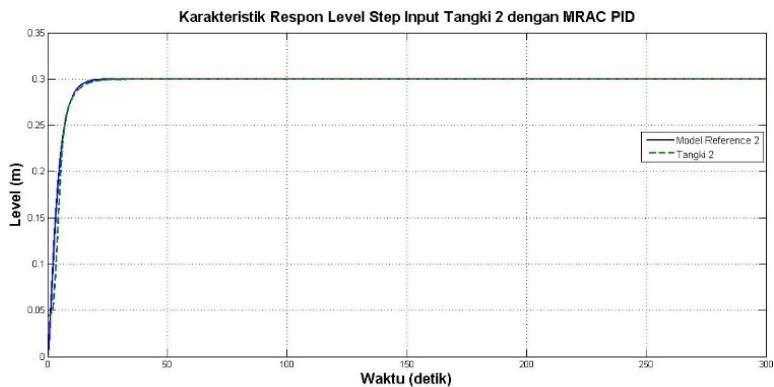
###### 4.4.1.1 Pengujian Tanpa Beban dengan Masukan Unit Step

Pengujian pertama adalah pengujian tanpa beban dengan sinyal *step input*. Tangki 1 diberikan *set point* sebesar 0,4 sedangkan tangki 2 diberikan *set point* sebesar 0,3. Dari hasil pengujian, dapat dianalisis bahwa respon tangki 2 selalu mengalami kelambatan atau *delay* dari model referensi. Hal tersebut dapat diatasi dengan menambahkan sejumlah nominal pada sinyal kontrol MRAC. Penambahan sinyal kontrol berfungsi untuk mempermudah kerja MRAC dalam mengejar *initial condition* level pada kedua tangki. Tanpa penambahan sinyal kontrol, MRAC tidak dapat *tracking* level dengan baik, atau dalam kata lain selalu terjadi *delay* saat mengikuti respon *model reference*. Perlu dicatat bahwa nominal tersebut harus lebih besar dari nilai *initial condition* level yang diberikan pada *subsystem plant*.

Pengujian pertama dijalankan dengan  $\beta_p$ ,  $\beta_i$  dan  $\beta_d$  masing-masing bernilai 7, 5 dan 1 untuk tangki 1, sedangkan 8, 6, 1 untuk tangki 2. Respon level tangki 1 memiliki RMSE sebesar 0,04cm, sedangkan respon level tangki 2 memiliki RMSE sebesar 0,04cm. RMSE yang didapat terbilang sangat memuaskan dengan nominal 0,1-0,15% dari nilai *set point*. Selain itu tidak terjadi osilasi setelah respon sistem sesuai dengan nilai model referensi. Sehingga dapat dikatakan bahwa respon level kedua tangki tidak memiliki  $E_{ss}$ .



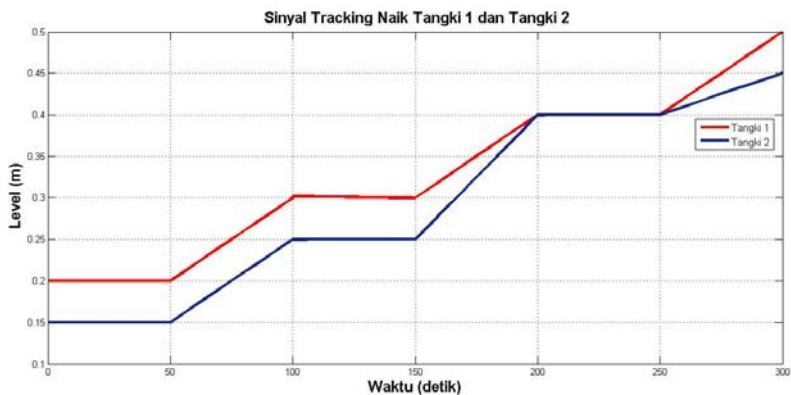
**Gambar 4.19** Respon level tangki 1 untuk *tracking* sinyal *unit step*



**Gambar 4.20** Respon level tangki 2 untuk *tracking* sinyal *unit step*

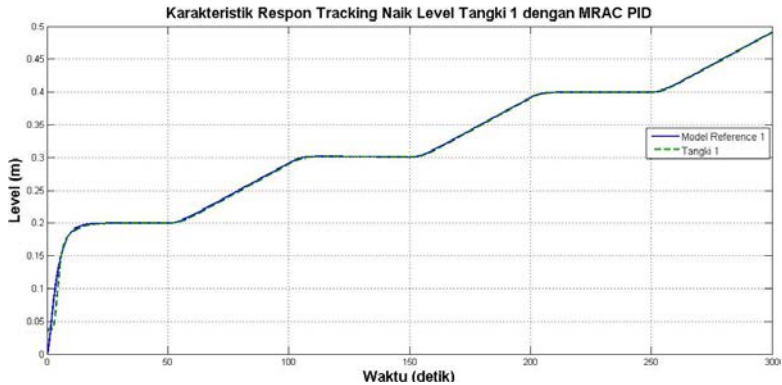
#### 4.4.1.2 Pengujian Tracking Naik Tanpa Beban

Pengujian kedua dalam kondisi tanpa beban adalah pengujian *tracking* level naik. Tangki 1 dan tangki 2 diberikan masukan berupa sinyal naik seperti yang terlihat pada Gambar 4.18 . Dari hasil pengujian, dapat dianalisis bahwa respon tangki 2 selalu mengalami kelambatan atau *delay* dari model referensi. Hal tersebut dapat diatasi dengan menambahkan sejumlah nominal pada sinyal kontrol MRAC. Penambahan sinyal kontrol berfungsi untuk memperbesar rentang nilai  $\beta_p$ ,  $\beta_i$  dan  $\beta_d$  yang diberikan.

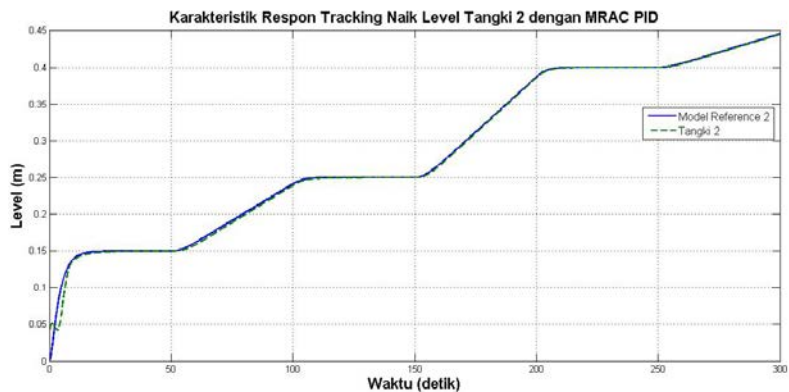


**Gambar 4.21** Sinyal uji *tracking* naik

Pengujian ini dijalankan dengan  $\beta_p$ ,  $\beta_i$  dan  $\beta_d$  masing-masing bernilai 16, 16 dan 3 untuk tangki 1, sedangkan 20, 19, 1 untuk tangki 2. Tangki 2 memiliki karakteristik respon yang berbeda dengan tangki 1 dalam hal adaptasi. Perbedaan itu terlihat dari terjadinya osilasi saat respon pertama kali dijalankan dan beradaptasi untuk mengejar nilai model referensi. Respon level tangki 1 memiliki RMSE sebesar 0,11cm, sedangkan respon level tangki 2 memiliki RMSE sebesar 0,15cm. RMSE yang didapat terbilang memuaskan. Respon tangki 1 dapat menyamai nilai model referensi dengan baik pada detik ke-22, sedangkan tangki 2 pada detik ke-29. Waktu yang dibutuhkan untuk menyamai nilai respon model referensi disebut dengan waktu adaptasi. Selain itu dari hasil pengujian didapat kesimpulan bahwa semakin tinggi *set point* level, maka *error* yang terjadi akan semakin kecil.



**Gambar 4.22** Respon *tracking* level naik tangki 1 tanpa beban



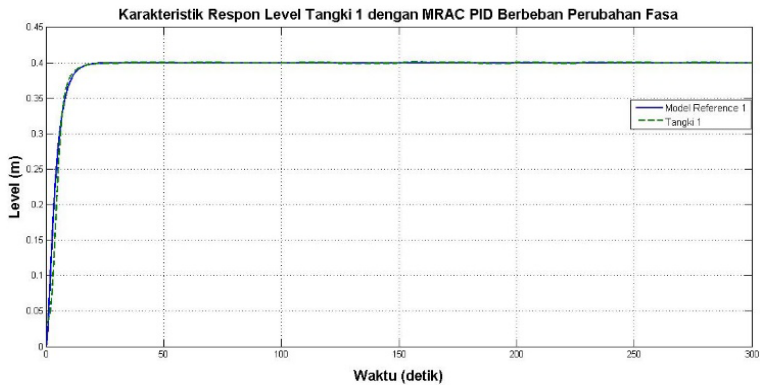
**Gambar 4.23** Respon *tracking* level naik tangki 2 tanpa beban

#### 4.4.2 Pengujian Berbeban Perubahan Fasa

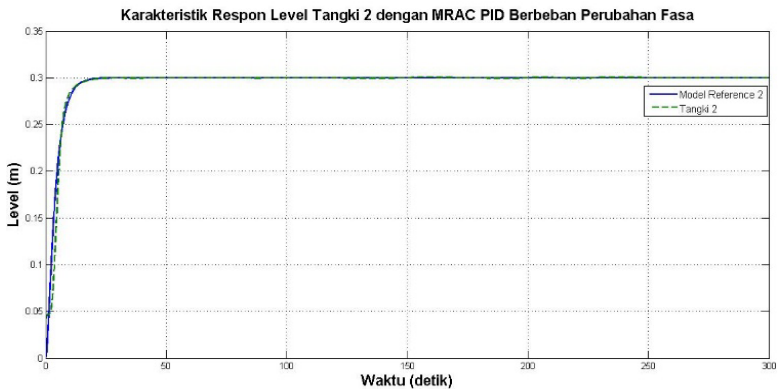
##### 4.4.2.1 Pengujian Berbeban Perubahan Fasa dengan Masukan Unit Step

Pengujian selanjutnya adalah pengujian berbeban perubahan fasa dengan sinyal *step input*. Tangki 1 diberikan *set point* sebesar 0,4 sedangkan tangki 2 diberikan *set point* sebesar 0,3. Pengujian dijalankan dengan  $\beta_p$ ,  $\beta_i$  dan  $\beta_d$  masing-masing bernilai 5 , 3 dan 1 untuk tangki 1, sedangkan 7, 6, 3 untuk tangki 2. Respon level tangki 1 memiliki RMSE

sebesar 0,1cm, sedangkan respon level tangki 2 memiliki RMSE sebesar 0,08cm. RMSE yang didapat terbilang sangat memuaskan dengan nominal 0,25-0,26% dari nilai *set point*. Selain itu osilasi yang terjadi terbilang sangat kecil disekitar nilai model referensi. Sehingga dapat dikatakan bahwa respon level kedua tangki hampir tidak memiliki  $E_{ss}$ . Dengan hasil yang diperoleh, maka dapat dibuktikan bahwa MRAC memiliki peformansi yang sedikit lebih baik dari *decoupler* dalam menjaga nilai respon.



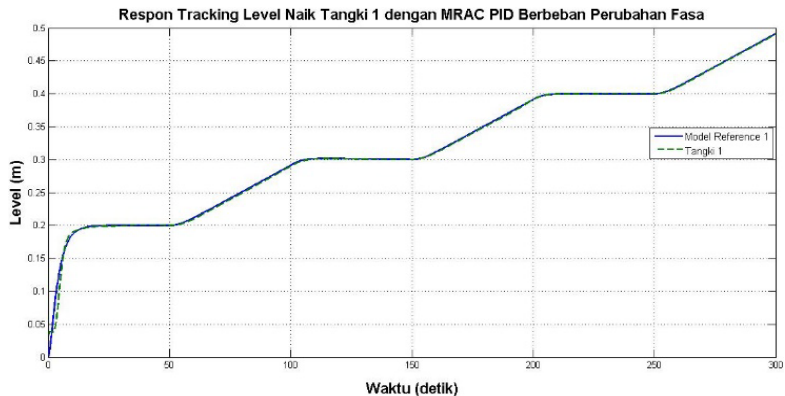
**Gambar 4.24** Respon level tangki 1 untuk *tracking* sinyal *unit step* berbeban perubahan fasa



**Gambar 4.25** Respon level tangki 2 untuk *tracking* sinyal *unit step* berbeban perubahan fasa

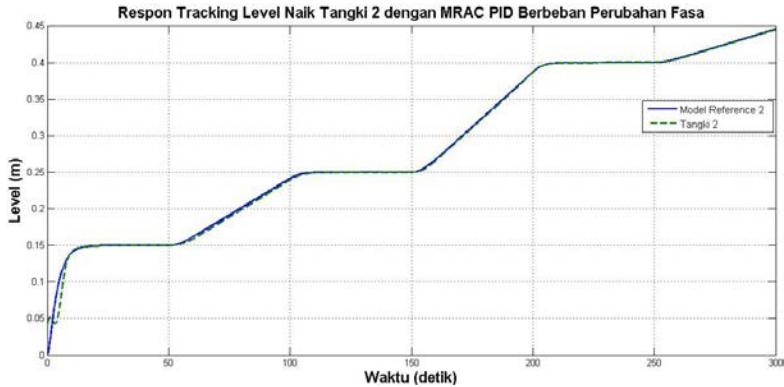
#### 4.4.2.2 Pengujian Tracking Naik Berbeban Perubahan Fasa

Pengujian kedua dalam berbeban perubahan fasa adalah pengujian *tracking* level naik. Tangki 1 dan tangki 2 diberikan masukan berupa sinyal naik seperti yang terlihat pada Gambar 4.18. Pengujian ini dijalankan dengan  $\beta_p$ ,  $\beta_i$  dan  $\beta_d$  masing-masing bernilai 16 , 15 dan 3 untuk tangki 1, sedangkan 21, 19, 1 untuk tangki 2. Respon tangki 1 terlihat mendahului respon model referensi pada detik ke-6 dan dapat menyamai nilai model referensi pada detik ke-20. Tangki 2 memiliki karakteristik respon yang berbeda dengan tangki 1 dalam hal adaptasi. Perbedaan itu terlihat dari terjadinya osilasi saat respon pertama kali dijalankan dan beradaptasi untuk menyamai nilai model referensi di detik ke-28. Waktu yang dibutuhkan untuk menyamai nilai respon model referensi disebut dengan waktu adaptasi.



**Gambar 4.26** Respon *tracking* level naik tangki 1 berbeban perubahan fasa

Tangki 1 memiliki respon yang sedikit lebih baik dalam hal *tracking* respon model referensi bila dibandingkan dengan tangki 2. Hal itu dapat diakibatkan lebih tingginya *initial condition* yang diberikan pada tangki 2. Selain itu dari hasil pengujian didapat kesimpulan bahwa semakin tinggi *set point* level, maka *error* yang terjadi akan semakin kecil. Respon level tangki 1 memiliki RMSE sebesar 0,12cm, sedangkan respon level tangki 2 memiliki RMSE sebesar 0,15cm. RMSE yang didapat terbilang memuaskan dengan nominal tidak sampai 1cm.



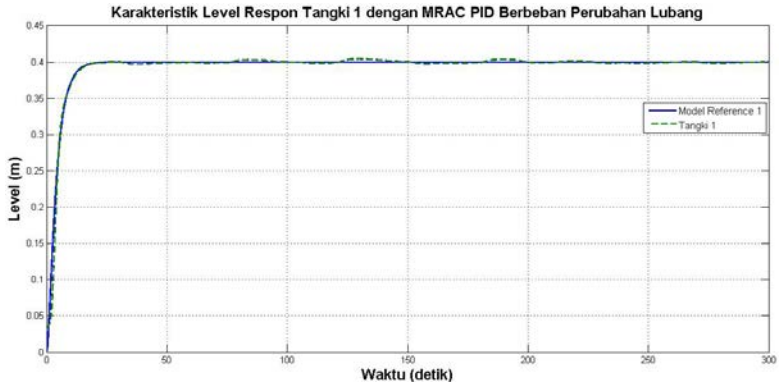
**Gambar 4.27** Respon *tracking* level naik tangki 2 berbeban perubahan fasa

#### 4.4.3 Pengujian Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang Tangki 1 dan Tangki 2

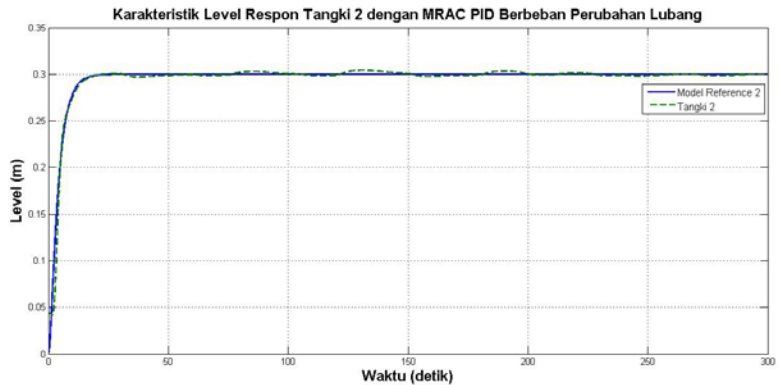
##### 4.4.3.1 Pengujian Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang dengan masukan Unit Step

Pengujian berbeban terakhir adalah pengujian berbeban perubahan lubang buang tangki 1 dan tangki 2 dengan sinyal *step input*. Pengujian ini dilakukan untuk membuktikan kelebihan MRAC dalam menjaga nilai respon sesuai dengan *set point*. Tangki 1 diberikan *set point* sebesar 0,4 sedangkan tangki 2 diberikan *set point* sebesar 0,3. Pengujian dijalankan dengan  $\beta_p$ ,  $\beta_i$  dan  $\beta_d$  masing-masing bernilai 5, 1 dan 1 untuk tangki 1, sedangkan 9, 10, 3 untuk tangki 2. Respon level tangki 1 memiliki RMSE sebesar 0,18cm, sedangkan respon level tangki 2 memiliki RMSE sebesar 0,17cm. RMSE yang didapat terbilang sangat memuaskan dengan nominal 0,45-0,6% dari nilai *set point*. Selain itu osilasi yang terjadi terbilang sangat kecil disekitar nilai model referensi. Simpangan level terbesar pada tangki 1 terjadi pada detik ke-190 dengan nilai +0,3cm. Sedangkan simpangan level terbesar tangki 2 terjadi di detik ke-130 dengan nilai +0,43cm. Sehingga dapat dikatakan bahwa respon level kedua tangki hampir memiliki  $E_{ss}$  yang sangat kecil dan dapat di tolerir. Dengan hasil yang diperoleh, maka dapat dibuktikan bahwa MRAC memiliki peformansi yang jauh lebih baik dari *decoupler* dalam menjaga nilai respon.





**Gambar 4.28** Respon level tangki 1 untuk *tracking* sinyal *unit step* berbeban perubahan ukuran lubang buang

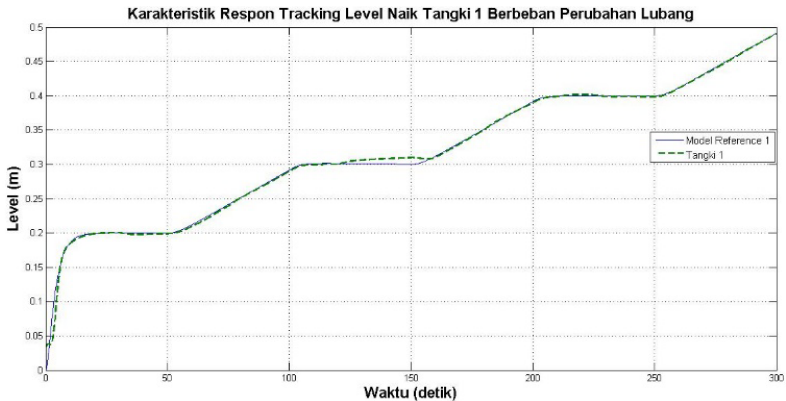


**Gambar 4.29** Respon level tangki 2 untuk *tracking* sinyal *unit step* berbeban perubahan ukuran lubang buang

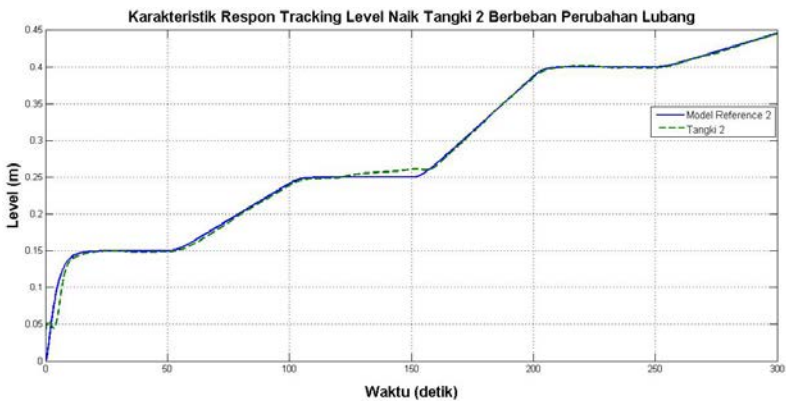
#### 4.4.3.2 Pengujian Tracking Naik Berbeban Perubahan Ukuran Lubang Buang

Pengujian terakhir dalam berbeban perubahan ukuran lubang buang tangki 1 dan tangki 2 adalah pengujian *tracking* level naik. Tangki 1 dan tangki 2 diberikan masukan berupa sinyal naik seperti yang terlihat pada Gambar 4.18. Pengujian ini dijalankan dengan  $\beta_p$ ,  $\beta_i$  dan  $\beta_d$  masing-masing bernilai 17, 16 dan 3 untuk tangki 1, sedangkan 17, 16, 2 untuk

tangki 2. Respon tangki 1 dapat menyamai nilai model referensi pada detik ke-24. Tangki 2 memiliki karakteristik respon yang berbeda dengan tangki 1 dalam hal adaptasi. Perbedaan itu terlihat dari terjadinya osilasi saat respon pertama kali dijalankan dan beradaptasi untuk menyamai nilai model referensi di detik ke-25. Waktu yang dibutuhkan untuk menyamai nilai respon model referensi disebut dengan waktu adaptasi.



**Gambar 4.30** Respon *tracking* level naik tangki 1 berbeban perubahan perubahan ukuran lubang buang



**Gambar 4.31** Respon *tracking* level naik tangki 2 berbeban perubahan perubahan ukuran lubang buang

Baik tangki 1 maupun tangki 2 mengalami simpangan level terjauh pada detik ke-121 sampai detik ke-158. Hal ini diakibatkan ukuran lubang buang sedang dalam kondisi minimum. Simpang yang besar juga terjadi diakibatkan MRAC belum selesai melakukan proses adaptasi, namun *set point* sudah mengalami kenaikan. Tangki 1 memiliki respon yang sedikit lebih baik dalam hal *tracking* respon model referensi bila dibandingkan dengan tangki 2. Hal itu dapat diakibatkan lebih tingginya *initial condition* yang diberikan pada tangki 2. Respon level tangki 1 memiliki RMSE sebesar 0,27cm, sedangkan respon level tangki 2 memiliki RMSE sebesar 0,32cm. RMSE yang didapat terbilang memuaskan dengan nominal dibawah 1cm.

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## BAB 5 PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a) *Decoupler* berhasil melinearisasi respon *non-linier quadruple tank plant* kedalam respon sistem orde satu. Hal ini terbukti dari nilai RMSE sebesar 0 bila dibandingkan dengan respon orde satu *time constant* yang sama.
- b) Pengaturan *level quadruple tank* menggunakan MRAC PID dapat melakukan regulasi yaitu mempertahankan nilai *level* sesuai dengan model referensi yang diberikan. Performansi tersebut terjaga baik dalam kondisi tanpa beban maupun berbeban perubahan fasa atau perubahan ukuran lubang buang.
- c) MRAC PID terbukti jauh lebih baik dalam hal menjaga nilai respon *plant* pada *set point* dari pada *decoupler*. MRAC PID menghasilkan RMSE sebesar  $\pm 0,5\%$  sedangkan *decoupler* sebesar  $\pm 12\%$ .
- d) Terjadinya *lagging* dengan waktu tertentu saat respon sistem dalam proses menyamai respon model referensi. Waktu tunda ini dapat disebut sebagai waktu yang digunakan oleh kontroler MRAC PID untuk melakukan proses adaptasi parameter kontroler. Sejumlah konstanta harus ditambahkan pada sinyal kontrol MRAC PID demi meminimalisir *lagging* yang terjadi.
- e) Untuk keperluan *tracking*, sistem yang telah dirancang hanya mampu menjalankan fungsi dengan nilai referensi naik. Hal ini disebabkan tidak adanya mekanisme yang dapat dikendalikan pada *quadruple tank plant* untuk mengurangi *level* air.

### 5.2 Saran

Dari penelitian yang dilakukan, untuk pengembangan berikutnya, akan lebih baik jika digunakan suatu sistem pengaturan cerdas untuk *tuning* nilai dari *gain* mekanisme adaptasi. Selain mempermudah perancangan, proses pemilihan dengan cara *trial-and-error* belum tentu memberikan hasil yang terbaik. Selain itu ada modifikasi dari mekanisme *quadruple tank plant* yang tersedia di Laboratorium Pengendalian Proses Departemen Teknik Kimia yang dapat dijadikan objek penelitian.

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. D. Johnson, "Process Control Instrumentation Technology", Edinburgh: Prentice Hall, 2003.
- [2] G. Nurlita, "Diktat Kuliah Dasar Sistem Pengaturan", Surabaya: Jurusan Teknik Elektro ITS, 2011.
- [3] X. Christie dan P. S. Jose, "Design Of Model Reference Adaptive Control For A Quadruple," dalam *International Conference on Innovations in Information Embedded and Communication Systems*, 2015..
- [4] M. J. Jayaprakash, "State Variable Analysis of Four Tank System," dalam *Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, Coimbatore, 2014.
- [5] F. Farras, "Perancangan Kontroler PI dengan Menggunakan Teknik MRAC Untuk Mengatur Level pada Coupled Tank". Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [6] K. Ogata, "751," dalam *MODERN CONTROL ENGINEERING*, New Jersey, Prentice Hall, 2010, p. 751.
- [7] K. J. Astrom dan B. Wittenmark, "Adaptive Control", New York: Addison-Wesley, 1995.

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*



## BIOGRAFI PENULIS

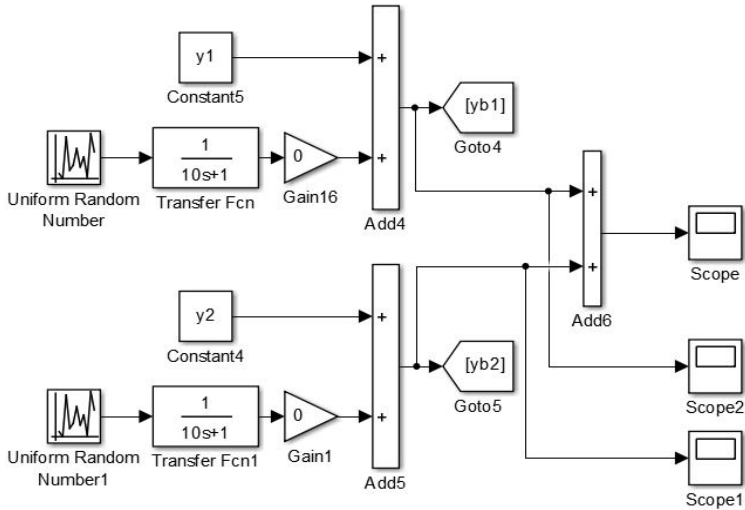


**Muhammad Baihaqi**, dilahirkan di Jakarta pada tanggal 3 januari 1996. Penulis merupakan putra kedua dari dua bersaudara. Putra dari pasangan Sofwan Hidayat dan Afifah ini memulai jenjang pendidikan di TK Tunas Harapan, SD Yasporbi I Jakarta, SMP Negeri 115 Jakarta, dan SMA Negeri 61 Jakarta hingga lulus pada tahun 2013. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur mandiri. Selama kuliah, penulis aktif dalam kegiatan organisasi mahasiswa sebagai staff departemen PROKESMA HIMATEKTRO ITS 2014/2015 dan kepala departemen PROKESMA pada tahun 2015/2016. Penulis aktif dalam kegiatan pelatihan (seperti LKMM PRA-TD, LKMM TD, dan PJTD). Selanjutnya, penulis juga aktif dalam kepanitiaan (seperti ELECTRA dan IMAE). Penulis dapat dihubungi melalui email [mbaihaqi1996@gmail.com](mailto:mbaihaqi1996@gmail.com).

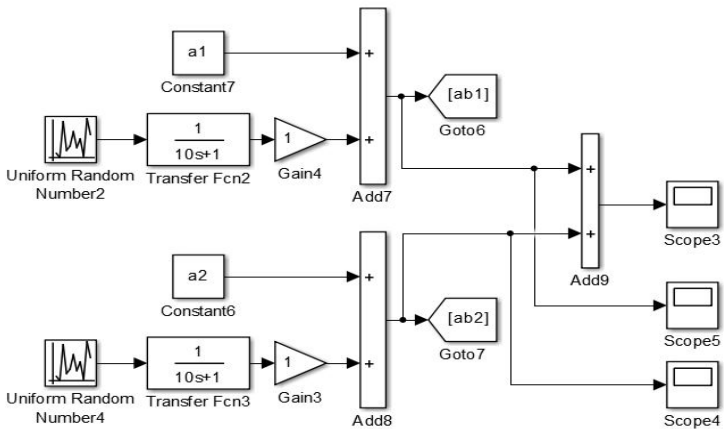
*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## LAMPIRAN

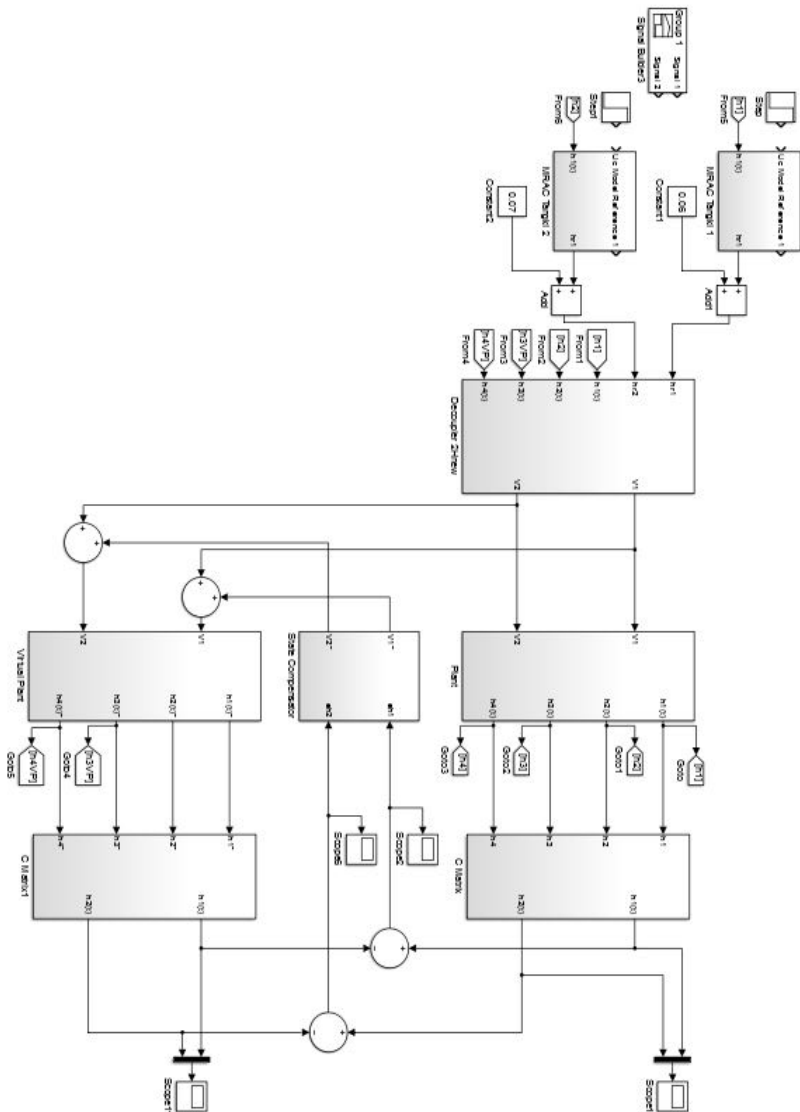
### Blok Simulink Pembebanan Perubahan Fasa



### Blok Simulink Pembebanan Perubahan Ukuran Lubang Buang Tangki 1 dan Tangki 2



## Blok Simulink Keseluruhan Sistem



## Script Matlab Parameter Plant

```
%Parameter Plant
A1=0.03143
A2=0.03143
A3=0.03143
A4=0.03143
a1=3.665*10^-5
a2=3.665*10^-5
a3=6.723*10^-5
a4=6.723*10^-5
g=9.8
K=1
y1=0.7
y2=0.7
%Decoupler
B11=(K*y1)/A1
B12=0
B21=0
B22=(K*y2)/A2
B=[B11 B12;B21 B22]
BB=inv(B)
BB11=BB(1,1)
BB12=BB(1,2)
BB21=BB(2,1)
BB22=BB(2,2)
T1=4
T2=4
beta_P=17
beta_I=16
beta_D=3
beta_P2=17
beta_I2=16
beta_D2=2
```

```
%Parameter Virtual Plant
A1VP=0.03143
A2VP=0.03143
A3VP=0.03143
A4VP=0.03143
a1VP=3.665*10^-5
a2VP=3.665*10^-5
a3VP=6.723*10^-5
a4VP=6.723*10^-5
g=9.8
KVP=1
```